

DISEÑO DE UN EQUIPO DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA POR VÍA HÚMEDA
PARA EL ENRIQUECIMIENTO DE MINERAL DE HIERRO

CLAUDIA MARCELA SANTAMARIA HURTADO

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
2017

DISEÑO DE UN EQUIPO DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA POR VÍA HÚMEDA
PARA EL ENRIQUECIMIENTO DE MINERAL DE HIERRO

CLAUDIA MARCELA SANTAMARIA HURTADO

Informe Final presentado en la modalidad de Monografía como requisito parcial
para obtener el título de INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Ing.- Dr. Mont. Carlos Guillermo Carreño Bodensiek
Director del Proyecto

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
2017

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. MARCO TEÓRICO	14
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA	14
1.1.1 Clasificación de los materiales según su reacción a un campo magnético.	14
1.1.1.1 Diamagnéticos.	15
1.1.1.2 Paramagnéticos.	15
1.1.1.3 Ferromagnéticos.	15
1.1.1.4 Ferrimagnéticos.	15
1.1.1.5 Antiferromagnéticos.	16
1.1.2 Fuentes de campo magnético.	16
1.1.2.1 Imanes permanentes.	17
1.1.2.2 Electroimanes con núcleo de hierro.	18
1.1.2.3 Electroimán de fuerza portante.	19
1.1.2.4 Electroimán de acción a distancia.	19
1.1.3 Tipos de separadores magnéticos.	19

1.1.3.1 Separadores magnéticos por vía seca.	20
1.1.3.2 Separación seca vs separación húmeda.	20
1.2 FÍSICA DEL PROCESO DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA	23
1.2.1 Fuerza magnética sobre una partícula magnetizable.	25
1.2.2 Fuerzas opositoras en un separador magnético.	27
1.2.3 Cantidades fundamentales del magnetismo y sus unidades.	29
1.2.3.1 Campo magnético y magnetización.	29
1.2.3.2 Susceptibilidad magnética y permeabilidad.	29
1.3 VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO	31
1.4 MINERAL DE HIERRO	32
1.4.1 Magnetita. $\alpha - Fe_3O_4$	34
1.4.2 Titanomagnétitas. $Fe_3 - xTi_xO_4$	35
1.4.3 Maghemita. $(\gamma - Fe_2O_3)$	35
1.4.4 Hematita. $\alpha - Fe_2O_3$	35
1.4.5 Goethita. $\alpha - FeOOH$	36
1.4.6 Siderita. $FeCO_3$	36
1.4.7 Sulfuros de hierro.	37
1.4.8 Cromitas. $(Fe, Mg)(Cr, Al, Fe)_2O_4$	37

2. ESTADO DEL ARTE	38
3. DISEÑO DEL SEPARADOR MAGNÉTICO	41
3.1 PARTES DEL EQUIPO	41
3.1.1 Sistema Magnético.	41
3.1.2 Sistema de alimentación y transporte.	42
3.1.3 Mecanismo de transmisión.	42
3.2 MINERAL DE HIERRO DE LA REGIÓN DE BOYACÁ	43
3.3 DISEÑO	47
3.3.1. Selección del tamaño de las partículas de alimentación y porcentaje de sólidos en la suspensión.	47
3.3.1.1 Magnetita.	48
3.3.1.2 Limonita.	50
3.3.1.3 Ensayos de Fluidez.	51
3.3.2 Electroimán.	54
3.3.2.1 Material del núcleo.	55
3.3.2.2 Dimensiones del núcleo del electroimán.	55
3.3.3 Fuente de alimentación.	63
3.3.4 Tambor.	64
3.3.5 Eje.	65

3.3.6 Selección de Rodamientos y Anillos de retención.	83
3.3.7 Selección de Motor.	86
3.3.8 Sistema de transmisión.	87
3.3.9 Alimentador.	92
3.3.10 Canal.	93
3.3.11 Elementos de sujeción.	93
3.3.12 Soporte.	94
3.3.13 Tornillos y tuercas.	95
3.3.14 Raspador.	95
3.3.15 Conjunto.	96
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	98
5. CONCLUSIONES	101
BIBLIOGRAFIA	102
ANEXO A. PLANOS DEL EQUIPO DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA POR VÍA HÚMEDA.	107
ANEXO B. CATÁLOGOS.	129

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama esquemático de la alineación de los momentos magnéticos.	16
Figura 2. Esquema de un electroimán de núcleo de hierro, con dos posibles posiciones de las bobinas.	19
Figura 3. Tanque concurrente.	22
Figura 4. Tanque contra-rotación.	22
Figura 5. Tanque contracorriente	23
Figura 6. Representación esquemática del proceso de separación magnética.	24
Figura 7. Arreglo de polos magnéticos en un separador magnético de tambor.	26
Figura 8. Arrastre hidrodinámico, fuerza de gravedad y fuerza magnética, en función del diámetro de partícula.	28
Figura 9. Susceptibilidad magnética para materiales paramagnéticos y diamagnéticos.	30
Figura 10. Sistema magnético.	41
Figura 11. Sistema de alimentación y transporte	42
Figura 12. Sistema de transmisión.	43
Figura 13. Manifestaciones y yacimientos de hierro en Boyacá.	44
Figura 14. Magnetita grande y gruesa.	48
Figura 15. Magnetita triturada.	49
Figura 16. Magnetita tamizada en malla 50, 120 y 200 respectivamente.	49

Figura 17. Limonita triturada.	50
Figura 18. Limonita tamizada en malla 50, 120 y 200 respectivamente	50
Figura 19. Proporción solido-fluido de cada malla de material.	52
Figura 20. Segundo ensayo de fluidez.	53
Figura 21. Geometría del conjunto núcleo-bobina.	56
Figura 22. Geometría importada y cercado en ANSYS	57
Figura 23. Curva de magnetización del hierro puro recocido.	57
Figura 24. Asignación de sistemas coordenadas.	58
Figura 25. Propiedades del conductor.	58
Figura 26. Flujo magnético paralelo.	59
Figura 27. Intensidad magnética total (visualización vectorial).	59
Figura 28. Intensidad magnética total (visualización min y max).	60
Figura 29. Código Matlab.	60
Figura 30. Inducción magnética producida por el electroimán.	61
Figura 31. Electroimán.	62
Figura 32. Dimensiones medias de la bobina. Dimensiones en mm.	62
Figura 33. Fuente de alimentación regulable Lavolta Lab BPS-305.	64
Figura 34. Tambor.	65
Figura 35. Tapa delantera y trasera.	65
Figura 36. Curvas tensión-deformación típicas para el acero inoxidable y el acero al carbono en la condición de recocido.	66

Figura 37. Diagrama de cuerpo libre del eje.	67
Figura 38. Diagrama de la viga en el plano YZ.	68
Figura 39. Diagrama de la viga en el plano XY.	68
Figura 40. Fuerzas sobre las poleas.	71
Figura 41. Diagrama de poleas para el cálculo del ángulo θ	72
Figura 42. Diagrama de cortante del primer análisis.	74
Figura 43. Diagrama de momento del primer análisis.	75
Figura 44. Diagrama de cortante segundo análisis.	76
Figura 45. Diagrama de momento segundo análisis.	76
Figura 46. Diagrama para análisis de deflexión.	77
Figura 47. Eje.	80
Figura 48. Distribución de esfuerzos producidos por las cargas en el eje.	82
Figura 49. Deformación producida por las cargas en el eje.	82
Figura 50. Parámetro de diseño de la polea.	89
Figura 51. Polea.	90
Figura 52. Alimentador y tapa corrediza.	92
Figura 53. Canal.	93
Figura 54. Elemento de sujeción.	94
Figura 55. Soporte.	94
Figura 56. Raspador.	96
Figura 57. Equipo de separación magnética.	97

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Algunas propiedades físicas de minerales ferromagnéticos.	36
Tabla 2. Composición química de los minerales de estudio.	45
Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de los minerales de estudio.	45
Tabla 4. Composición mineralógica del mineral de Paz del Rio.	46
Tabla 5. Composición mineralógica del mineral de la vereda de Tencua.	46
Tabla 6. Influencia de la intensidad magnética sobre los minerales.	47
Tabla 7. Características de las mallas seleccionadas.	49
Tabla 8. Primer ensayo de fluidez mineral malla 50.	51
Tabla 9. Tiempo que toma la suspensión en recorrer toda la bandeja y en vaciarse del recipiente que la contiene.	53
Tabla 10. Masa de los elementos asociados al eje.	69
Tabla 11. Otros datos asociados al cálculo del eje.	69
Tabla 12. Parámetros seleccionados a partir del diámetro exterior de la polea.	90

RESUMEN

La industria siderúrgica obtiene grandes pérdidas al procesar el mineral extraído, pues contiene una gran cantidad de impurezas que aumentan los costos de producción y afectan el producto final. Es por esto que los equipos de separación magnética son de vital importancia para la productividad y la eficiencia del sector siderúrgico y minero.

Este trabajo presenta el diseño de un equipo de separación magnética por vía húmeda para los laboratorios de INCITEMA de la UPTC para el enriquecimiento de mineral de hierro principalmente de la región de Boyacá.

Con este propósito, en primer lugar se identificaron las distintas variedades de mineral de hierro presentes en la región de Boyacá, con sus respectivas propiedades fisicoquímicas y mineralógicas. Luego y tras comprender el funcionamiento del equipo, se determinaron sus componentes principales, así como su función en el conjunto.

Luego se procedió, con esta información, a seleccionar el material más adecuado para cada elemento que conforma el separador; y así diseñar el electroimán, que cumpliera con los requisitos del mineral, y el eje fijo, que permitiera la rotación del tambor.

Posteriormente se diseñaron las demás partes del equipo y se seleccionaron los elementos de sujeción y transmisión comerciales más apropiados, para completar el modelo CAD del conjunto.

Palabras claves: separador magnético por vía húmeda, mineral de hierro, Boyacá, INCITEMA, electroimán.

INTRODUCCIÓN

En Colombia la industria siderúrgica es de gran importancia para la economía pues contribuye con 12 % del producto interno bruto (PIB) nacional y generan el 13 % del total del empleo en el sector industrial del país, ya que está conformado por más de 1600 empresas.¹

Boyacá cuenta con algunas de las empresas más importantes del sector y posee importantes reservas de mineral, entre las cuales una de los más abundantes es la de mineral de hierro en muchas de sus variedades y un mayor aprovechamiento de este recurso resultará en mayor rentabilidad de las empresas y del sector en el departamento. Por esto, determinar métodos para reducir las pérdidas de materia prima y aumentar la producción es una causa permanente del planteamiento de investigaciones y proyectos que mejoren los procesos de fabricación y obtención de acero.

Una alternativa para enriquecer el mineral de hierro es aplicar la técnica de separación magnética por vía húmeda que permite separar el mineral valioso de la ganga, y es ampliamente usada por diferentes sectores industriales entre ellos la industria siderúrgica con resultados satisfactorios.

Muchas empresas no pueden adquirir un equipo de separación magnética por lo que compran éste y otros servicios relacionados a terceros, que puedan realizarlos de forma eficiente y confiable.

Este trabajo tiene el propósito de diseñar un equipo de separación magnética por vía húmeda para enriquecer el mineral de Boyacá, que permita realizar pruebas para lograr un mayor aprovechamiento y así proveer a la comunidad, y al sector siderúrgico y minero en especial, de una plataforma de servicios de pruebas y ensayos de laboratorio en el área específica del enriquecimiento de minerales.

Adicionalmente representa la posibilidad de obtener un equipo que está pensado y diseñado para trabajar con el mineral propio de la región lo que añade ventajas a la hora de procesarlo e induce menos pérdidas de material, y que al ser un equipo de

¹ Especial Industria Siderúrgica en Colombia. En Colombia, la producción es mucho menor que la demanda. Portafolio. Disponible en Internet:< <http://www.portafolio.co/negocios/especial-industria-siderurgica-colombia-0>>

laboratorio contara con un tamaño menor a los equipos industriales, lo que es favorable pues ocupará poco espacio sin llegar a perder eficiencia.

Con la introducción de este equipo se pretende aumentar la productividad de las empresas que soliciten el servicio, debido a un mayor aprovechamiento de los recursos minerales que por razones de tamaño o mezcla con otros componentes no puedan ser seleccionados con facilidad y posteriormente usados en el proceso de sinterización y enriquecimiento.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA

El proceso de separación magnética tiene como objetivo separar partículas magnéticas de diferentes rangos de tamaños, desde varias decenas de milímetros hasta fracciones de micras, haciendo uso de la susceptibilidad magnética que presentan todos los materiales. La separación se consigue haciendo pasar las suspensiones o las mezclas de partículas a través de un campo magnético no homogéneo, lo que conduce a la retención preferencial o desviación de las partículas magnetizables.

Este tiene como principales aplicaciones la purificación de la alimentación con fragmentos metálicos y la concentración de material magnético.

El material deseado en el primer caso es la fracción no magnética eliminando pequeñas cantidades de partículas magnéticas desde una gran cantidad de material de alimentación no magnético, mientras que en el segundo, el material valioso es la fracción magnética que se obtiene al separar una gran cantidad de producto magnético de la ganga.

Los separadores magnéticos que remueven fragmentos metálicos son utilizados para proteger equipos, como trituradoras, pulverizadores, etc, y para la purificación de muchos tipos de alimentaciones. En cuanto a los separadores magnéticos empleados para la concentración magnética, generalmente, se usan para el beneficio de varios minerales fuertemente magnéticos².

1.1.1 Clasificación de los materiales según su reacción a un campo magnético. Todos los materiales se ven afectados de alguna manera cuando se colocan en un campo magnético, aunque con la mayoría el efecto es demasiado ligero para ser detectado. De esta forma los materiales se pueden clasificar en tres grandes grupos, según si se sienten atraídos o repelidos por un imán:

² SVOBODA, Jan. Magnetic techniques for the treatment of materials. Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2004. p. 1. ISBN 1-4020-2038-4.

1.1.1.1 Diamagnéticos. Los materiales diamagnéticos son repelidos a lo largo de las líneas de fuerza magnética a un punto donde la intensidad del campo es menor. Las fuerzas implicadas aquí son muy pequeñas y las sustancias diamagnéticas no pueden concentrarse magnéticamente³.

1.1.1.2 Paramagnéticos. Estos materiales son atraídos a lo largo de las líneas de fuerza magnética de mayor intensidad de campo, y se pueden concentrar en separadores magnéticos de alta intensidad. Ejemplos de materiales paramagnéticos son ilmenita (FeTiO_3), rutilo (TiO_2), wolframita ($(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$), monacita (fosfato de tierras raras), siderita (FeCO_3), pirrotita (FeS), cromita (FeCr_2O_4), hematita (Fe_2O_3), y los minerales de manganeso. Algunos elementos son en sí mismos paramagnéticos, como Ni, Co, Mn, Cr, Ce, Ti, O, y los metales del grupo del Pt, pero en la mayoría de los casos las propiedades paramagnéticas de minerales se deben a la presencia de hierro en alguna forma⁴.

1.1.1.3 Ferromagnéticos. El ferromagnetismo puede considerarse como un caso especial de paramagnetismo, que implica fuerzas muy altas. Los materiales ferromagnéticos tienen muy alta susceptibilidad a las fuerzas magnéticas y retienen algo de magnetismo cuando se retira el campo, lo que se conoce como remanencia. Estos materiales se pueden concentrar en los separadores magnéticos de baja intensidad, siendo la magnetita (Fe_3O_4) el mineral ferromagnético más separado, aunque la hematita (Fe_2O_3) y la siderita (FeCO_3) pueden producir magnetita y, por tanto, pueden ser separados con igual facilidad⁵.

1.1.1.4 Ferrimagnéticos. En este tipo de materiales los momentos magnéticos están ordenados en sentido antiparalelo, pero la suma de los momentos que apuntan en una dirección es mayor que la suma de los que apuntan en la otra dirección. Sus propiedades son similares a las de los materiales ferromagnéticos, pues ambos exhiben saturación y su magnetización es mucho mayor a la de otras clases

³ WILLS, Barry; NAPIER-MUN, Tim. Magnetic and electrical separation. En: Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Butterworth-Heinemann, 2006. p. 353. ISBN 978-08-097053-0.

⁴ Ibid., p. 353.

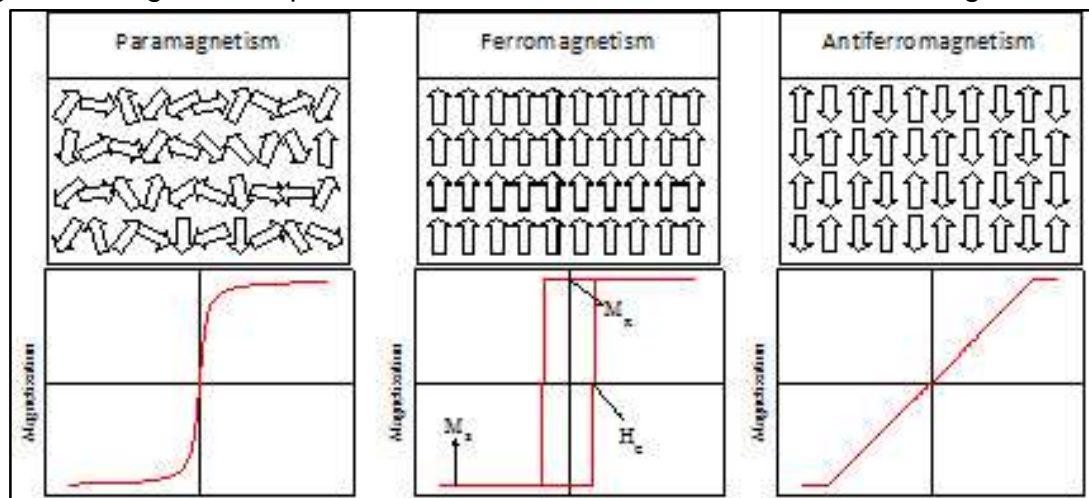
⁵ Ibid., p. 353

magnéticas. Ocurren principalmente en ferritas y óxidos mixtos de hierro, además de la maghemita⁶.

1.1.1.5 Antiferromagnéticos. Este tipo de materiales están formados por varias sub redes cuyos momentos tienden a ser antiparalelos e iguales, de modo que el momento neto del material es igual a cero. Los materiales antiferromagnéticos exhiben pequeñas susceptibilidades positivas, y se produce en óxidos de metales de transición, como MnO, CoO y NiO, además de la hematita⁷.

En la figura 1 se muestra un diagrama del comportamiento de los materiales frente a un campo magnético externo.

Figura 1. Diagrama esquemático de la alineación de los momentos magnéticos.



Fuente: COEY, J. Magnetism and Magnetic Materials, Cambridge, 1a Ed., 2010, Cap. 1.

1.1.2 Fuentes de campo magnético. El campo magnético en los equipos de separación magnética puede ser producido por electroimanes o imanes permanentes, principalmente.

⁶ SVOBODA. Op. cit., p. 21.

⁷ Ibid., p. 21

1.1.2.1 Imanes permanentes. Los imanes permanentes atraen con fuerza variable las materias magnéticas, debido a que poseen una reserva de energía que permite compararlos con generadores de energía, en este caso magnética, que también puede transformarse en mecánica o eléctrica; la mecánica manifestada bajo la forma de fuerza portante o atracción a distancia y la eléctrica manifestada por la aparición de una fuerza electromotriz en los bornes de un arrollamiento colocado en las proximidades de un campo magnético variable creado por el imán⁸.

Estos imanes no requieren de energía exterior, pues las aleaciones especiales de estos imanes continúan produciendo un campo magnético a un nivel constante en forma indefinida después de su carga inicial, a menos que sean expuestos a influencias desmagnetizadoras, que debilitan la inducción permanente que existe en el interior del metal que ha sido sometido a un campo magnético. La desimantación debe ser potente para ser eficaz; produciendo un campo por lo menos igual al campo de imantación⁹.

Para regular la intensidad de campo magnético se puede variar la distancia interpolar lo que permitirá el tratamiento de varios tipos de minerales. Hay cuatro grandes familias de materiales de imanes permanentes:

- Ferritas. Estos imanes tuvieron su inicio el año 1952. Actualmente son conocidos como imanes cerámicos y poseen costos más bajos que los otros. Son resistentes a la corrosión, a los ácidos, sales lubricantes y gases. Su máxima temperatura de trabajo es de 250 °C. Su fórmula química puede ser expresada como $MO.6(Fe_2O_3)$, donde M puede ser Ba, Sr o Pb¹⁰.
- Alnico. Los imanes AlNiCo (aleación de aluminio, níquel, cobalto y hierro) son fabricados a través de un proceso de fundición, tienen buena resistencia a la corrosión y pueden ser utilizados en ambientes con temperatura de hasta 500 °C o 550 °C, manteniendo a estas temperaturas buena estabilidad. Tienen buena resistencia a la corrosión casi tanto como el acero inoxidable¹¹.
- Samario-Cobalto (SmCo). Los imanes de samario-cobalto (SmCo) fueron desarrollados en 1960, como resultado de investigaciones de nuevos materiales

⁸ MIMEUR, Robert. Electromecánica de precisión. Barcelona: Ed. Reverté S.A. 1955. p. 77.

⁹ Ibid, p. 78.

¹⁰ PAVEZ, Osvaldo. Apuntes de concentración de minerales 2. Departamento de Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama. 2013. p. 70.

¹¹ Ibid, p. 70.

magnéticos basados en aleaciones de Fe, Co, Ni, y tierras raras. A pesar de las excelentes propiedades magnéticas y resistencia a la temperatura que posee (hasta 250 °C), el alto costo de estos imanes puede limitar sus aplicaciones. Poseen razonable resistencia a la corrosión y no necesitan de revestimientos particulares, pero son muy frágiles por lo que deben ser manejados con cuidado¹².

- Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB). Los imanes de neodimio-hierro-boro, también conocidos como de tierras raras o “súper imanes”, entraron en el mercado en 1980 y es el material magnético más moderno. Poseen las mejores propiedades de todos los imanes existentes y una increíble relación inducción/peso. A pesar de tener una resistencia a la temperatura menor que la del imán de SmCo, el costo es muy competitivo.

Estos imanes son altamente susceptibles a la corrosión y deben, en la mayoría de los casos, poseer revestimiento, normalmente niquelado, tratados con cinc o revestidos con resina epoxi. Su máxima temperatura de trabajo es 180 °C¹³.

1.1.2.2 Electroimanes con núcleo de hierro¹⁴. Una separación efectiva de partículas débilmente magnéticas de pequeño tamaño requiere un incremento del campo magnético más allá de los valores disponibles con imanes permanentes. Además como el campo magnético disminuye muy rápidamente desde la superficie de un imán permanente, el volumen efectivo en el cual se puede producir una fuerza magnética lo suficientemente alta, es limitado. Por lo tanto, con el fin de generar un campo magnético lo suficientemente alto en un gran volumen, que garantizaría un alto rendimiento en un separador magnético, un electroimán es la mejor opción.

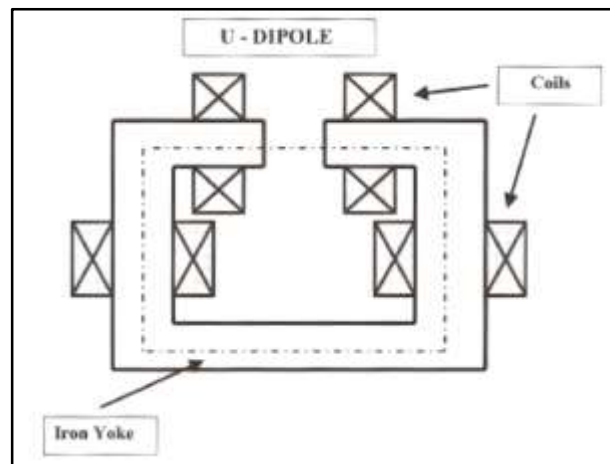
Los electroimanes utilizan vueltas de alambre de cobre o de aluminio, energizadas con corriente directa, alrededor de un núcleo de hierro, lo cual se muestra en la figura 2. La corriente eléctrica pasando a través de los bobinados magnetiza una gran masa de hierro, que a su vez produce un campo en el volumen de trabajo. Aunque la fuerza del campo obtenida es limitada por la saturación magnética del hierro, para algunas aplicaciones la fuerza magnética generada es usualmente suficiente. Además, la regulación de la intensidad del campo magnético se logra fácilmente variando la corriente eléctrica.

¹² PAVEZ. Op. cit., p. 70.

¹³ Ibid. p. 70.

¹⁴ SVOBODA. Op. cit., p. 53.

Figura 2. Esquema de un electroimán de núcleo de hierro, con dos posibles posiciones de las bobinas.



Fuente: SVOBODA, Jan. Magnetic Techniques for the treatment of materials. 2004.

1.1.2.3 Electroimán de fuerza portante. Están destinados a trabajar cuando el circuito magnético está completamente cerrado sobre el metal magnético, es decir, que hay contacto en todo momento entre el electroimán y el material a transportar. Se tiene en este caso el máximo efecto, pero es necesario observar que la energía mecánica así creada está disponible en estado potencial, es decir, que no haya desplazamiento relativo entre las piezas¹⁵.

1.1.2.4 Electroimán de acción a distancia. En estos electroimanes la armadura está separada de las piezas polares por un entrehierro de aire que debe recorrer el flujo magnético para efectuar el cierre del circuito magnético, con el fin de efectuar un trabajo mecánico. La presencia de un entrehierro aumenta notablemente la reluctancia del conjunto, teniendo en cuenta que la del hierro resulta insignificante con relación a la del aire¹⁶.

1.1.3 Tipos de separadores magnéticos. Los separadores magnéticos se dividen en: separadores del tipo húmedo o por vía húmeda y, separadores del tipo seco o por vía seca.

¹⁵ MIMEUR. Op. cit., p. 87.

¹⁶ Ibid. p. 87.

1.1.3.1 Separadores magnéticos por vía seca¹⁷. Son usados principalmente para remover residuos de hierro, concentrar mineral de hierro grueso, recuperar hierro valioso del alto horno y la escoria de las acerías, y remover impurezas magnéticas. Son usados para proteger equipos de manipulación y procesamiento de material como trituradoras y procesadoras. Estos separadores se utilizan con material seco o con material que contenga solo humedad superficial.

Los residuos de hierro vienen en muchas formas y tamaños, los cuales son suficientes para causar daños. Las partículas de diámetro menor a 3 mm, usualmente no causan daño al equipo aunque pueden decolorar o contaminar el producto.

Existen varios equipamientos magnéticos para la separación de fragmentos metálicos, tales como, placas magnéticas, poleas magnéticas, imanes suspendidos, tambores.

1.1.3.2 Separación seca vs separación húmeda¹⁸. Aunque los separadores magnéticos en seco son aplicados satisfactoriamente en el beneficio de un amplio espectro de minerales, existen varias desventajas básicas, las cuales impiden un uso más amplio de un proceso seco. Para que la separación magnética en seco sea exitosa, el mineral debe estar completamente seco, lo que añade un proceso adicional que es costoso y prolongado.

Con métodos secos, también se debe tener cuidado y asegurar el control pues existe un posible riesgo de polvo, lo que implica una inversión costosa en capital y costos de operación. Además, los separadores en seco tienen rendimientos considerablemente más bajos que los separadores por vía húmeda. Con el fin de extender el proceso de la separación magnética a minerales finos débilmente magnéticos, es preferible usar los separadores magnéticos por vía húmeda que generan una fuerza magnética lo suficientemente alta en el espacio de trabajo.

1.1.3.3 Separadores magnéticos por vía húmeda¹⁹. Dos tipos de separadores magnéticos por vía húmeda son los más frecuentemente usados: los separadores de tambor con imanes permanentes o electromagnéticos y los filtros magnéticos.

¹⁷ SVOBODA. Op. cit., p. 69.

¹⁸ Ibid. p. 96.

¹⁹ SVOBODA. Op.cit., p. 81.

Los separadores de tambor por vía húmeda son equipos utilizados como unidades de recuperación en plantas de medios densos, en la concentración de minerales de hierro ferromagnéticos y los filtros magnéticos son utilizados para eliminar o separar partículas ferromagnéticas finas de los líquidos o suspensiones de líquidos.

Los tambores magnéticos por vía húmeda están diseñados para la descarga magnética continua, mientras que los filtros magnéticos acumulan las partes magnéticas y el elemento filtrante tiene por lo tanto que ser periódicamente desmontado y limpiado.

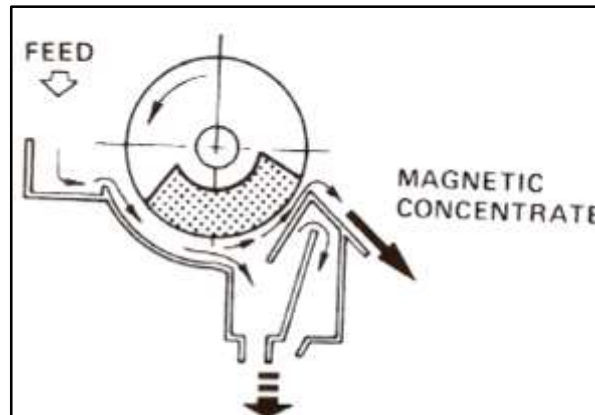
El tambor está parcialmente sumergido en un tanque de agua y lleva el material a ser tratado a través de la cara del sistema magnético y el concentrado magnético sale del tanque. El tamaño de la alimentación tratada en estos separadores raramente excede los 6 mm mientras que el tamaño mínimo de la alimentación puede ser tan pequeño como 20 μm .

El diseño de los tanques para el separador de tambor es muy importante y es determinado por los objetivos del proceso de separación. Hay tres diseños de separadores básicos, basados en el flujo de la suspensión: concurrente, contra-corriente, contra-rotación.

- Tipo concurrente. La alimentación es introducida en un extremo del separador a través de la caja de alimentación y fluye en la misma dirección de la rotación del tambor. Estos tanques presentan un alto rendimiento en operaciones donde se desea un concentrado magnético extremadamente limpio a partir de una alimentación relativamente gruesa. Es utilizado en la concentración de menas magnéticas gruesas (menor que $\frac{1}{4}$ ") y relativamente libre de ultrafinos (un 15 a 22% máximo de tamaño inferior a 200 mallas). Son ampliamente usados en los sistemas de recuperación de medio denso, en el cual las partículas se sumergen en un fluido de densidad intermedia, con el fin de que algunas partículas floten y otras se hundan²⁰.

²⁰ PAVEZ. Op. cit., p. 76.

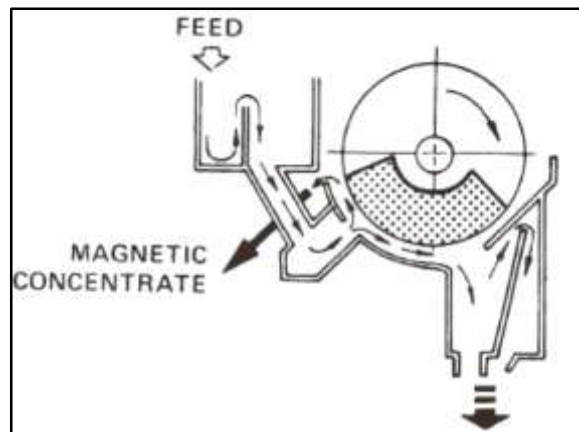
Figura 3. Tanque concurrente.



Fuente: PAVEZ, Osvaldo. Apuntes de concentración de minerales 2. Universidad de Atacama. 2013.

- Tanque contra-rotación. En estos separadores la alimentación fluye en dirección opuesta a la rotación del tambor, como se ilustra en la figura 5. Este tipo de tanque se utiliza ampliamente en operaciones de desbaste (rougher), donde es más importante obtener menores pérdidas de material magnético en los relaves que un concentrado limpio. Se aplica a materiales con granulometría inferior a 40 mallas (a veces hasta materiales inferiores a 10 mallas)²¹.

Figura 4. Tanque contra-rotación.

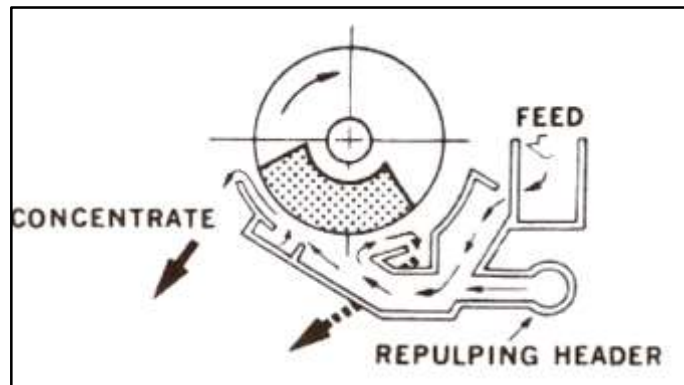


Fuente: PAVEZ, Osvaldo. Apuntes de concentración de minerales 2. Universidad de Atacama. 2013.

²¹ PAVEZ. Op. cit., p. 76.

- Tanque contracorriente. En estos separadores la alimentación es forzada a viajar en dirección opuesta a la rotación del tambor, y se descarga en el interior del canal de relaves. Se utiliza para operaciones de limpieza aplicada a materiales de granulometría fina, menores a 65 mallas o más finos. Para operaciones de recuperación de medio denso es deseable, en algunos casos, hacer una combinación entre los tipos concurrentes/contra-rotación para asegurar una recuperación óptima de magnetita o ferrosilicio. En ese caso, los relaves generados en una etapa realizada con separadores del tipo concurrente son retratados en una etapa donde se utilizan separadores del tipo contra-rotación²².

Figura 5. Tanque contracorriente



Fuente: PAVEZ, Osvaldo. Apuntes de concentración de minerales 2. Universidad de Atacama. 2013.

1.2 FÍSICA DEL PROCESO DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA

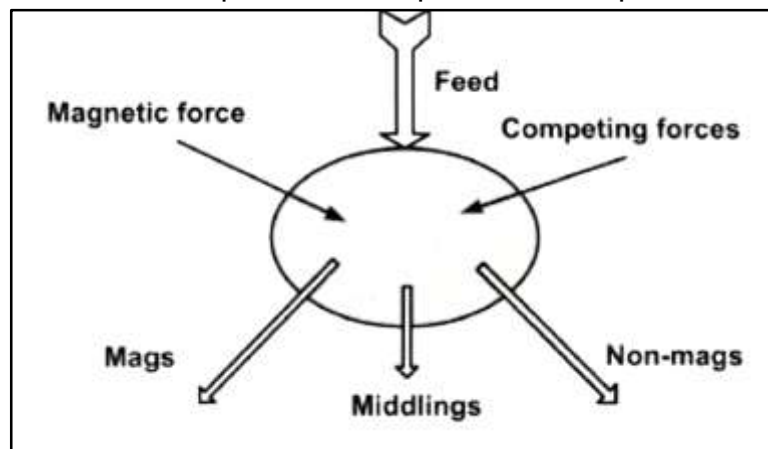
La separación magnética es una separación física de partículas basada en la competencia de la fuerza magnética atractiva, las fuerzas gravitacional y de inercia, las fuerzas interparticulares. Estas fuerzas combinadas actúan sobre las partículas de diferentes propiedades magnéticas presentes en el material de alimentación²³. Un diagrama esquemático del proceso de separación se muestra en la figura 6.

²² PAVEZ. Op. cit., p. 76.

²³ OBERTEUFFER, John. Magnetic Separation: A review of principles, devices, and applications. En: Transactions on magnetics, Vol. Mag-10, No. 2, 1974. p. 223.

Por tanto, es claro que una condición necesaria (pero no suficiente) para una separación exitosa de partículas más fuertemente magnéticas de las partículas menos fuertemente magnéticas en un campo magnético es que la fuerza magnética F_{mag}^m que actúa sobre las partículas más fuertes debe ser mayor que la suma de todas las fuerzas que se oponen F_{comp}^{im} . Simultáneamente, una fuerza magnética que actúa sobre las partículas menos fuertes, F_{mag}^n debe ser menor que la suma de las fuerzas que compiten correspondientes.

Figura 6. Representación esquemática del proceso de separación magnética.



Fuente: SVOBODA, Jan. Magnetic Techniques for the treatment of materials. 2004

Por lo tanto, se deben cumplir las siguientes condiciones:

$$F_{mag}^m \geq \sum F_{comp}^{im} \quad y \quad F_{mag}^n \leq \sum F_{comp}^{in} \quad \text{Ec. 1}$$

En general, una mezcla de partículas introducidas en el separador magnético se divide en dos o más componentes. Sin embargo, en cualquier separación real, ambas, partículas magnéticas y no magnéticas se pueden encontrar en la fracción magnética, la fracción no magnética y las fracciones medias. La eficiencia de la separación se expresa normalmente por la recuperación del componente magnético, la relación de material magnético en el concentrado con respecto al de la alimentación, y por el grado del producto magnético, la fracción de material magnético en el concentrado²⁴.

²⁴ SVOBODA. Op. cit., p. 3.

1.2.1 Fuerza magnética sobre una partícula magnetizable²⁵. La energía magnética U_{mp} de una partícula magnetizable de volumen V_p ubicada en el campo magnético es:

$$U_{mp} = \frac{1}{2} \mu_p V_p H^2 \quad \text{Ec. 2}$$

Mientras que la energía magnética de un fluido del mismo volumen está dado por

$$U_{mf} = \frac{1}{2} \mu_f V_p H^2 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde μ_p y μ_f son permeabilidades magnéticas de la partícula y del fluido, respectivamente. El incremento de energía U del sistema (partícula + fluido) está dado, en principio, como la diferencia entre las energías. Para partículas débilmente magnéticas es una buena aproximación.

$$U = \frac{1}{2} (\mu_f - \mu_p) V_p H^2 \quad \text{Ec. 4}$$

En general, una fuerza se puede expresar como $\vec{F} = -\nabla U$, donde ∇ es el operador del gradiente. Teniendo en cuenta que $\mu_j = \mu_0(1 + \kappa_f)$, donde κ_f es la susceptibilidad magnética volumétrica del material j y μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, la fuerza magnética se puede escribir (en unidades del SI):

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 (\kappa_p - \kappa_f) V_p \nabla H^2 \quad \text{Ec. 5}$$

En situaciones prácticas la densidad de flujo magnético B es usada con frecuencia, en vez de la intensidad de campo magnético H , por lo que la fuerza magnética se puede expresar así,

$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu_0} (\kappa_p - \kappa_f) V_p B \nabla B \quad \text{Ec. 6}$$

Para partículas suficientemente fuertes magnéticas ($\kappa_p \gg \kappa_f$) es ventajoso escribir

²⁵ SVOBODA. Op. cit., p. 5.

$$\vec{F}_m = \mu_0 V_p M \nabla B \quad \text{Ec. 7}$$

Donde M es la magnetización de la partícula.

En la práctica es más fácil medir la susceptibilidad magnética específica (masa) χ en vez de la susceptibilidad del volumen, y asumiendo que $\chi_f \ll \chi_p$,

$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu_0} (\chi_p - \chi_f) m_p B \nabla B \quad \text{Ec. 8}$$

Donde m_p es la masa de la partícula.

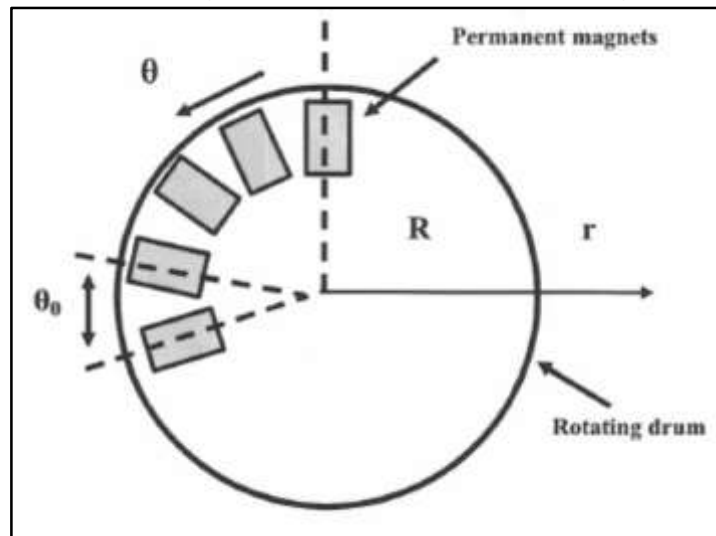
Se puede ver de las ecuaciones anteriores la magnitud de la fuerza magnética es proporcional al producto de la densidad de flujo magnético y su gradiente. Esta fuerza se ejerce en la dirección del gradiente de campo, no del campo magnético.

La inducción magnética alrededor del tambor magnético está dada por:

$$B = B_0 \exp \left[\frac{-\pi(r - R)}{\theta_0 R} \right] \quad \text{Ec. 9}$$

Donde B_0 es la inducción magnética en la superficie de tambor, y r , R y θ_0 se muestran en la figura 7.

Figura 7. Arreglo de polos magnéticos en un separador magnético de tambor.



Fuente: SVOBODA, Jan. Magnetic Techniques for the treatment of materials. 2004

1.2.2 Fuerzas opositoras en un separador magnético²⁶. Las fuerzas en un separador magnético que compiten con la fuerza magnética y actúan en todas las partículas que viajan a través del separador son la fuerza de gravedad, el arrastre hidrodinámico y la fuerza centrífuga. Dependiendo del tipo de separador magnético estas fuerzas pueden ser más o menos importantes.

Para una partícula esférica de radio b y densidad ρ_p la fuerza gravitacional está dada por:

$$\vec{F}_g = \frac{4}{3}\pi b^3(\rho_p - \rho_f)\vec{g} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde ρ_f y g son la densidad del medio fluido y la aceleración por la gravedad, respectivamente.

La fuerza centrífuga puede expresarse como:

$$\vec{F}_c = (\rho_p - \rho_f)wV_p\vec{r} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde r es la posición radial de la partícula y w es la velocidad angular.

La fuerza de arrastre hidrodinámico se puede obtener de la ecuación de Stokes:

$$\vec{F}_d = 6\pi\eta b(\vec{v}_p - \vec{v}_f) \quad \text{Ec. 12}$$

Donde η es la viscosidad dinámica del fluido y v_p y v_f son las velocidades del fluido y la partícula, respectivamente.

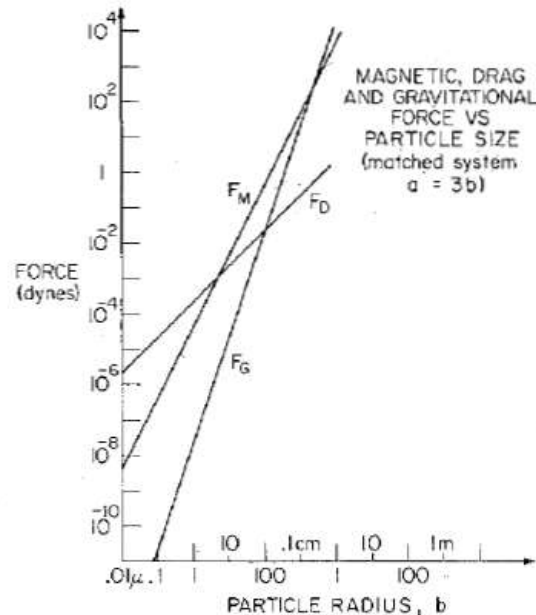
Se puede ver de las tres ecuaciones que:

$$F_g \approx b^3, \quad F_c \approx b^3 \quad y \quad F_d \approx b \quad \text{Ec. 13}$$

La dependencia de las fuerzas gravitacional y centrífuga del radio de las partículas a la tercera potencia significa que estas serán importantes en presencia de partículas grandes. La fuerza de arrastre hidrodinámico depende solo de la primera potencia de b , por lo que será importante para partículas pequeñas. En separadores húmedos que utiliza pequeñas partículas, la fuerza magnética debe ser mayor que el arrastre hidrodinámico para permitir la separación de las partículas magnéticas.

²⁶ OBERTEUFFER. Op. cit., p. 228

Figura 8. Arrastre hidrodinámico, fuerza de gravedad y fuerza magnética, en función del diámetro de partícula.



Fuente: OBERTEUFFER, John. Magnetic Separation: A review of principles, devices, and applications. En: Transactions on magnetics. 1974.

La fuerza magnética depende en el cubo de radio de la partícula y su importancia relativa en el proceso de separación magnética está determinada por las propiedades magnéticas de las partículas y por los parámetros técnicos del separador magnético (i , e , intensidad de campo magnético y su gradiente).

Es claro que el tamaño de la partícula es un factor discriminante más importante en la separación magnética que la susceptibilidad magnética. Ya que $F_m \approx \kappa b^3$, incluso una gran diferencia en las susceptibilidades magnéticas de los componentes de una mezcla, pobremente clasificada, a ser separados no necesariamente resultara en una separación selectiva. La selectividad de la separación será determinada por el equilibrio de la fuerza magnética y las fuerzas oppositoras actuando sobre las partículas²⁷.

²⁷ SVOBODA. Op. cit., p. 6.

1.2.3 Cantidades fundamentales del magnetismo y sus unidades²⁸.

1.2.3.1 Campo magnético y magnetización. La unidad de medición de la densidad de flujo magnético o inducción magnética B y la intensidad de campo magnético H se relacionan en el vacío por la ecuación

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde la permeabilidad magnética del vacío μ_0 es numéricamente igual a $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$. En un material magnético de magnetización M , la inducción magnética total se convierte, en la convención de Sommerfeld,

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad \text{Ec. 15}$$

1.2.3.2 Susceptibilidad magnética y permeabilidad. La magnetización de un material depende del campo magnético actuando en él. Para muchos materiales M es proporcional a H (al menos cuando H no es muy grande) por lo que se puede escribir:

$$\vec{M} = \kappa \vec{H} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde κ , la susceptibilidad magnética volumétrica, es una propiedad del material. Combinando las ecuaciones 15 y 16, se tiene que

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (1 + \kappa) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde

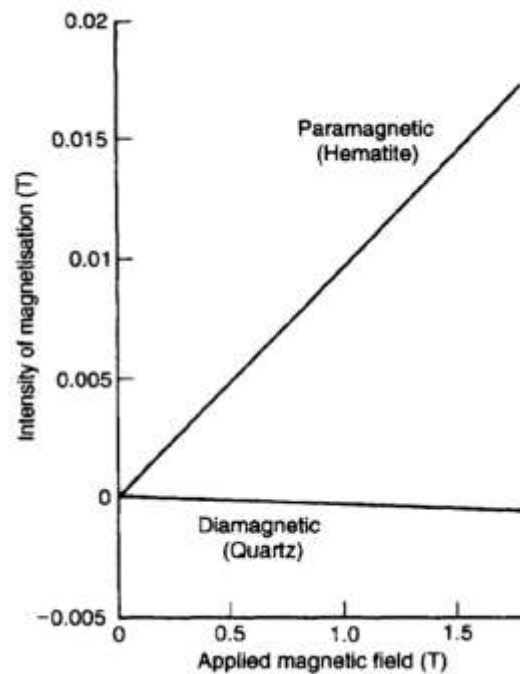
$$\mu_r = 1 + \kappa \quad \text{y} \quad \mu = \mu_0 (1 + \kappa) \quad \text{Ec. 18}$$

μ_r es la permeabilidad magnética relativa y es adimensional. Mientras que μ es la permeabilidad magnética y tiene por unidad H/m .

²⁸ WILLS. Op. cit., p. 354.

Para materiales paramagnéticos, κ es una constante positiva y para materiales diamagnéticos es una constante negativa. En la figura 9 muestra la magnetización M contra la fuerza de campo magnético H , para materiales paramagnéticos (hematita) y diamagnéticos (cuarzo).

Figura 9. Susceptibilidad magnética para materiales paramagnéticos y diamagnéticos.



Fuente: OBERTEUFFER, John. Magnetic Separation: A review of principles, devices, and applications. En: Transactions on magnetics. 1974.

La susceptibilidad magnética también puede ser expresada con respecto a la unidad de masa del material de densidad ρ , y entonces

$$\chi = \frac{\kappa}{\rho} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde χ es la susceptibilidad magnética de masa.

1.3 VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO²⁹

Los factores asociados con las propiedades de la alimentación, que afectan la recuperación del material magnético son,

- La velocidad de flujo volumétrico (t/h/m). La velocidad de flujo volumétrico de la suspensión es un factor primario en el dimensionamiento de tambores húmedos. La recuperación del material magnético está directamente relacionada con la capacidad de la unidad o la tasa de flujo a través del separador. Como el caudal aumenta, la velocidad de la suspensión y por consiguiente, la fuerza de arrastre de los fluidos aumenta lo que tiende a separar o quitar las partículas del campo magnético. El volumen de suspensión de alimentación excesivo se traducirá en un aumento de las pérdidas magnéticas y una disminución del concentrado.
- Tamaño de las partículas de alimentación (máx. 10 mm) y distribución de tamaños. Con el fin de trabajar en un equipo de separación por vía húmeda, el tamaño de las partículas de mineral debe ser muy pequeño (por el orden de los 75 μm), pero es importante que la alimentación no contenga partículas muy finas, menores al tamaño mencionado, pues una excesiva concentración de estos aumenta los problemas de viscosidad, afecta la separación y produce un concentrado magnético menos limpio. Además es importante no diluir mucho la mezcla, ya que esto dificulta la recuperación magnética y reduce el volumen de alimentación.
- Carga magnética o la cantidad de mineral magnético en la suspensión de alimentación. Es otro factor primario en el dimensionamiento de separadores magnéticos de tambor húmedo. Cualquier tambor para separación en húmedo tiene la característica de la eliminación de una cantidad limitada de mineral basado en el diámetro del tambor, la velocidad periférica, y la intensidad de campo magnético. Esto se conoce como la carga magnética. Carga magnética se mide en toneladas de mineral magnético/hora/metro de ancho de tambor.
- Porcentaje de sólidos en la suspensión de alimentación. Este parámetro afectará directamente a la selectividad de la separación. A medida que aumenta el

²⁹ NORRGRAN, Daniel. Wet Drum magnetic separators for heavy Media Application, Operation, and Performance. En: International Coal Preparation Congress 2010 Conference Proceedings, Pennsylvania, United States. Rick Q. Honaker. 2010. p. 316.

porcentaje de sólidos, las pérdidas magnéticas aumentarán debido al aumento del grado de competencia en el campo magnético. La gravedad específica del concentrado magnético también disminuirá debido al aumento de atrapamiento físico de los no Magnéticos.

- Porcentaje de sólidos magnéticos en la suspensión de alimentación. La recuperación magnética se ve afectada por la cantidad de sólidos magnéticos en la suspensión de alimentación. Es muy difícil estimar la recuperación de mineral sin analizar el contenido magnético de la suspensión de alimentación. En los separadores magnéticos de tambor húmedo se suelen perder menos de 0,25 gramos de mineral magnético/litro de líquido cuando se aplica correctamente. En estas condiciones, si la suspensión de alimentación contiene sólo 10 gramos mineral magnético/litro, la recuperación será del 97,5%. Sin embargo, si la alimentación contiene 200 gramos de mineral magnético/litro, la recuperación será del 99,9%. Por lo tanto, se puede observar que la eficiencia de un separador de tambor húmedo depende de la cantidad de mineral magnético presente en la suspensión de alimentación.

1.4 MINERAL DE HIERRO

Todas aquellas rocas sedimentarias químicas que contiene más del 15% de hierro se denominan mineral de hierro, y los cuerpos de rocas mapeables compuestos principalmente por mineral de hierro se conocen como formación de hierro.³⁰

Cuando mediante minería es posible extraer el mineral del yacimiento y posteriormente mediante metalurgia se obtiene el hierro de dicho mineral se dice que ese mineral es mena.³¹ Asociado a este concepto se encuentra el de ganga que son todos aquellos minerales sobrantes que se extraen junto con la mena del yacimiento, por lo que se deben separar de la mena, ya que disminuyen la ley de la misma.

El hierro es el metal de transición más abundante de la corteza terrestre, y existe también en el universo, encontrándose en meteoritos. Es el principal metal que compone el núcleo de la tierra hasta con un 70%. Es uno de los 8 grandes elementos

³⁰ Formación de hierro bandeado. https://es.wikipedia.org/wiki/Formaci%C3%B3n_de_hierro_bandeado.

³¹ Minerales. <http://www.areaciencias.com/TUTORIALES/LOS%20MINERALES.htm>

en la corteza terrestre, siendo el cuarto elemento más abundante con alrededor de un 5% en peso.³²

El hierro puro es de color blanco plateado brillante, que se oxida rápidamente en aire húmedo o con agua que contenga oxígeno disuelto. Es blando, maleable y dúctil, y es fuertemente magnético (ferromagnético). Además, tiene poco uso y se hace mucho más útil mediante aleación con otros materiales. Tiene su gran aplicación para formar los productos siderúrgicos, utilizando el hierro como elemento matriz para alojar otros elementos aleantes tanto metálicos como no metálicos, que confieren distintas propiedades al material.³³ Se considera que una aleación de hierro es acero si contiene menos de un 2,1 % de carbono; si el porcentaje es mayor, recibe el nombre de fundición.

El hierro forjado está hecho de hierro fundido fundiéndolo sobre un lecho de óxido de hierro. El resultado final es un material que es casi hierro puro, con sólo 0,1-0,2% de carbono, y menos del 0,5% total de impurezas. La purificación se produce porque el lecho de óxido de hierro oxida el carbono pasándolo a monóxido de carbono y a azufre, fósforo y silicio en sus formas de óxidos que forman parte de la escoria. El hierro forjado creado por este proceso es fuerte y resistente y se puede soldar y forjar.³⁴

El acero es una aleación purificada de hierro con carbono que se fabrica en estado líquido. La gama de contenido de carbono de los aceros es de 0,1 a 1,5%. Los aceros de bajo carbono (<0.2% carbono) se denominan aceros dulces. Son maleable y dúctil y se utilizan en lugar de hierro forjado. Los aceros medios (0,2 a 0,6% de carbono) se utilizan como acero de estructura (vigas, soportes). Los aceros de alto contenido en carbono (0,75 a 1,5% de carbono) se utilizan para la fabricación de herramientas de corte, instrumentos quirúrgicos, taladros y otras herramientas.³⁵ Como el hierro se oxida con facilidad se añade un 12% de cromo lo que produce acero inoxidable, debido a que se crea una capa de óxido de cromo superficial que protege al acero de la corrosión o formación de óxidos de hierro. También se puede añadir otro tipo de aleantes como el níquel para impedir la formación de carburos de cromo, los cuales aportan fragilidad y potencian la oxidación intergranular³⁶.

³² Hierro. <https://es.wikipedia.org/wiki/Hierro>

³³ Hierro. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pertab/fe.html>

³⁴ Ibid. p. 1.

³⁵ Ibid. p. 1.

³⁶ Hierro. Op. cit., p. 1

Algunas propiedades importantes del mineral de hierro son³⁷

- Susceptibilidad magnética. Grado de magnetización de un material en respuesta a la aplicación de un campo magnético.
- Magnetización de saturación. Proceso de magnetizar hasta llevar el material a saturación. Algunas veces es también llamada polarización de saturación.
- Temperatura de Curie. Temperatura sobre la cual un material ferromagnético pierde sus propiedades magnéticas³⁸.
- Temperatura de Néel. Temperatura por encima de la cual un material pierde sus propiedades antiferromagnéticas, pasando a comportarse como paramagnéticos³⁹.
- Fuerza coercitiva. Intensidad de campo magnético que se debe aplicar al material para reducir su magnetización a cero luego de que ha sido magnetizada hasta la saturación. Dicho esto, la coercitividad mide la resistencia de un material ferromagnético a ser desmagnetizado.

El hierro se encuentra formando parte de óxidos, carbonatos, sulfuros y silicatos.

1.4.1 Magnetita. $\alpha - Fe_3O_4$ es un mineral fuertemente magnético y contiene un 72% de hierro (es el mineral con más contenido de hierro) por lo que es la mena más importante. Tiene una gravedad específica de 5.2⁴⁰, la polarización de saturación a temperatura ambiente varía desde 0.55 T a 0.61 T y su temperatura de Curie es 575°C. La densidad de Fe_3O_4 pura es 5200 kg/m³.⁴¹

³⁷ Magnetismo: definiciones. http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/magnetismo_definiciones.htm#susceptividadmagnetica

³⁸ Temperatura de Curie. https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_Curie

³⁹ Temperatura de Neel. https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_N%C3%A9el

⁴⁰ DANA; HURLBUT, Cornelius. Mineralogía descriptiva. En: Manual de mineralogía. AMOROS, Jose. Barcelona: Ed. Reverté, S.A. 1960. p. 313.

⁴¹ SVOBODA. Op. cit., p. 26.

1.4.2 Titanomagnétitas. $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ son unos de los minerales magnéticos más comunes. La susceptibilidad magnética, la magnetización de saturación y la temperatura de Curie varían de manera regular con la composición del parámetro x desde $x = 0$ (magnetita) hasta $x = 1$ (ulvoespinela). La ilmenita (TiO_3Fe) es uno de los más abundantes, es paramagnético y tiene una gravedad específica de 4,7. La ilmenita no puede emplearse como mena de hierro debido a su difícil fusibilidad, pero la ilmenita se separa magnéticamente, por lo que el titanio y el hierro pueden ser recuperados independientemente⁴².

1.4.3 Maghemita. ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$) es un óxido simple de hierro⁴³ cuyas propiedades magnéticas son muy similares a las de la magnetita, aunque la composición de la maghemita es esencialmente la de la hematita. La maghemita es metaestable, es decir, que se encuentra en equilibrio aparente, pero que puede cambiar a un estado más estable, y se convierte a hematita a temperaturas entre 300 °C y 350 °C. La polarización de saturación a temperatura ambiente varía desde 0.48 T a 0.51 T.⁴⁴

1.4.4 Hematita. Es un óxido férrico que en estado puro contiene un 70% de hierro.⁴⁵ La hematita pura $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ tiene una estructura antiferromagnética por encima de la temperatura de Néel de aproximadamente 680 °C. A temperatura ambiente la polarización magnética es cerca del 0.5% de la de la magnetita, es decir, entre 15×10^{-4} a 30×10^{-4} T.

El ferromagnetismo débil de la hematita no se entiende completamente debido a su comportamiento complejo y contradictorio. Las propiedades varían de una muestra a otra y dependen de su origen. La susceptibilidad magnética de la hematita pura es una complicada función del tamaño de partícula, el campo magnético, y la temperatura, determinado por la interacción entre las contribuciones de ferromagnetismo y antiferromagnetismo.⁴⁶

⁴² DANA. Op. cit., p. 300.

⁴³ Maghemita. <https://es.wikipedia.org/wiki/Maghemita>

⁴⁴ SVOBODA. Op. cit, p. 31.

⁴⁵ Hematita. <https://es.wikipedia.org/wiki/Hematita>

⁴⁶ SVOBODA, Jan. Magnetic techniques for the treatment of materials. Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2004. ISBN 1-4020-2038-4.

1.4.5 Goethita. $\alpha - FeOOH$ es un hidróxido de hierro con un contenido del 63% en hierro, es un mineral paramagnético, con una gravedad específica de 4.37, tiene una magnetización más grande que la de la hematita pero más pequeña que la de la magnetita. Constituye una importante mena de hierro⁴⁷. Tiene una alta coercitividad, y la susceptibilidad magnética de masa varía desde $2.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ a $6 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$.⁴⁸ Y las propiedades físicas de algunos minerales ferromagnéticos se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Algunas propiedades físicas de minerales ferromagnéticos.

Mineral	Composición	Temperatura de Curie/Néel [°C]	Polarización de saturación [T]	Densidad [kg/m ³]
Magnetita	$\alpha - Fe_3O_4$	575	0.59-0.61	5200
Maghemita	$\gamma - Fe_2O_3$	350	0.48-0.51	4800
Hematita	$\alpha - Fe_2O_3$	680	10×10^{-4} a 30×10^{-4}	5300
Goethita	$\alpha - FeOOH$	120-130	50×10^{-7} a 50×10^{-4}	4300
Pirrotita	FeS	320	0.1	4600
Cromita	$FeCrO_4$	-84	1.9×10^{-5}	5090

Fuente: SVOBODA, Jan. Magnetic Techniques for the treatment of materials. 2004

1.4.6 Siderita. $FeCO_3$ carbonato de hierro que cuando se calienta en condiciones oxidantes, se descompone en minerales como maghemita, magnetita y el hidróxido de hierro. El producto de descomposición final es hematita. Resultados de extensas mediciones de susceptibilidad magnética de las muestras de siderita a temperatura ambiente muestran que la susceptibilidad no varía con el campo magnético aplicado. La susceptibilidad varía desde $8 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ hasta $11 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$.⁴⁹

⁴⁷ VENKATRAMAN, Partha; KNOLL, Frank; LAWVER, James. Chapter 7. Magnetic and electrostatic separation. En: Principles of mineral Processing. FUERSTENEAU, Maurice. Colorado: Society for mining, metallurgy, and exploration, Inc. 2003. p. 309. ISBN 0-87335-167-3.

⁴⁸ SVOBODA. Op. cit., p. 32.

⁴⁹ Siderita. <https://es.wikipedia.org/wiki/Siderita>

1.4.7 Sulfuros de hierro. Sus propiedades magnéticas se ven afectadas por las impurezas, y tamaño de grano. La pirrotita es el sulfuro de hierro magnético más común. La mayoría de estos minerales son muy inestables cuando se calientan y la temperatura de Curie de la pirrotita es de 320 °C. Su gravedad específica es de 5⁵⁰. Es ferrimagnético y es generalmente más fuertemente magnética que la hematita y la polarización de saturación a temperatura ambiente es cerca de 0.12 T⁵¹.

1.4.8 Cromitas. $(Fe, Mg)(Cr, Al, Fe)_2O_4$ debe su nombre al elemento cromo y contiene el 32% de hierro, cuando está compuesto de este. El cromo puede ser reemplazado por algo de aluminio y hierro férrico. Es la única mena del cromo y tiene una gravedad específica de 4.6⁵². Su susceptibilidad magnética varía de $6 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ a $30 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ a 4.3 K y $5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ a $12 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ a temperaturas más altas (78 y 136 K)⁵³.

⁵⁰ DANA. Op. cit., p. 223.

⁵¹ SVOBODA. Op. cit., p. 33.

⁵² DANA. Op. cit., p. 315.

⁵³ SVOBODA. Op. cit., p. 34.

2. ESTADO DEL ARTE

Desde el descubrimiento de los fenómenos magnéticos cerca del año 550 a.C. por los antiguos griegos, se ha observado que todos los materiales son susceptibles ante una fuerza magnética, y que así como existen en la naturaleza minerales capaces de producir estos efectos magnéticos, hay algunos materiales que al ser afectados por dichos efectos, son capaces replicar esta propiedad, dando a conocer lo que hoy se conoce como imanes naturales y artificiales.

A partir de esto, se ha tratado de aprovechar de cualquier forma posible las cualidades magnéticas de los minerales, lo que ha desarrollado una gran cantidad de aplicaciones entre las que destaca el proceso de separación magnética.

La importancia de este proceso, que se ocupa de separar dos tipos de materiales valiéndose de la diferencia de susceptibilidades entre ellos, fue reconocido solo hasta mediados del siglo 19, cuando Edison y otros demostraron la posibilidad de separación de minerales de hierro fuertemente magnéticos de la ganga no magnética; sin embargo solo recientemente, cerca de los últimos 40 años, las técnicas magnéticas se han convertido en la base de la manipulación de materiales, y han sufrido una amplia cantidad de modificaciones con el fin de adaptarse a las necesidades del mercado con criterios de eficiencia y rentabilidad, al tratar materiales que van desde lo grueso hasta lo coloidal y de lo fuertemente magnético a lo diamagnético.

En este caso es de interés el uso de este proceso en la concentración y recuperación de mineral de hierro haciendo uso de la separación magnética por vía húmeda, que es uno de los procesos más amplios e importantes, por lo que a continuación se muestran algunas de las aplicaciones que ha tenido a nivel mundial, así como los avances tecnológicos recientes en este campo.

El beneficio de magnetita para la producción de pelets vía RD- horno rotatorio, donde los pelets se aglomeraron en tamaños normalizados, y fueron hematizados ya que la magnetita es poco permeable a procesos de reducción. Luego se sometieron a un proceso de reducción directa en un horno Linder produciendo un prerreducido de hierro con un grado de metalización aceptable. Este prerreducido es una alternativa para la sustitución parcial de la chatarra en las siderúrgicas.⁵⁴

⁵⁴ FORERO, Alvaro; DIAZ, Sandra. Beneficio de una magnetita para producción de pelets utilizados en procesos de reducción directa. 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.

- La recuperación de hierro de los relaves usando separación magnética después del proceso de tostado de magnetización, pues los relaves son una de las clases de residuos sólidos más peligrosos y es necesario buscar la forma de reciclarlos. Esta técnica utiliza el proceso de tostado de magnetización tomando los residuos de mineral de hierro y asándolos a 800 °C durante 30 min, y moliendo las muestras tostadas durante 15 min; para luego utilizar la separación magnética. Con esto el grado de concentración es de 61,3% de Fe y la recuperación de 88,2%, por lo que una gran cantidad de hierro puede ser reutilizado.⁵⁵
- En el proceso de separación del mineral de hematita, el grado de concentrado y el grado de los relaves no puede ser medido continuamente pues es difícil utilizar modelos matemáticos exactos para describir las relaciones entre índices, como la corriente de excitación, el flujo de agua de lavado, la densidad de alimentación entre otras. Por lo tanto, la implementación de un método de control inteligente para la operación del proceso que contiene una capa de control de bucle y una capa de ajuste de optimización, que consiste en un modelo de configuración y un compensador de retroalimentación. Este método se aplicó con éxito en China al proceso de separación magnética de alta intensidad, consiguiendo controlar el grado de concentración y el grado de relaves, aumentando el primero y reduciendo el segundo.⁵⁶
- La producción de mineral de hierro superconcentrado por separación magnética de alta intensidad por vía húmeda, con el fin de conseguir una alimentación adecuado que contenga menos del 2% de sílice para la producción de acero. Las pruebas con el separador Jones han demostrado que este tipo de separación está bien adaptada para cumplir con una alta recuperación y costos de capital y operación atractivos, pues han producido superconcentrados que contienen menos de 1,5% de sílice y más del 90% de la recuperación de hierro que se obtendría por gravedad o por separación magnética de baja intensidad.⁵⁷
- Un avance importante es la aplicación de un sistema de retrodispersión acústica para el control de velocidad de la suspensión y la acumulación de material dentro de un separador magnético de baja intensidad por vía húmeda, ya que

⁵⁵ CHAO, Lia; et. al. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting. 2009.

⁵⁶ JINXIN, Liu; et. al. Intelligent control for operation of iron ore magnetic separating process. En: World Congress on Intelligent Control and Automation (7: June 25 - 27, 2008, Chongqing, China).

⁵⁷ BARTNIK, J.; ZABEL, W.; HOPSTOCK, D. On the production of iron ore superconcentrates by high-intensity wet magnetic separation. 1975

normalmente el único método disponible era vigilar el transporte de material entre operaciones utilizando equipo estándar para medir caudales, concentración de sólidos y distribución de tamaños.

Este sistema además de capturar los perfiles de velocidad internos, que algunas veces son muy complejos por la zona donde se analizan, ofrece indicaciones sobre la concentración de sólidos y la acumulación de material magnético.

Adicionalmente mantiene una carga de material equilibrado al utilizar la intensidad de retrodispersión para monitorearla, pues esto es importante para el rendimiento del separador, y ayuda al control del proceso.⁵⁸

- El separador magnético de baja intensidad por vía húmeda es el mejor si de concentrar partículas ferromagnéticas finas de suspensiones de mineral se trata, pero a pesar de esto el funcionamiento interno de la máquina es poco conocida, lo que causa que algunas veces se intente hacerla trabajar a una con una mayor carga con el fin de mantener las exigencias de calidad limitando el proceso.

Con el fin de comprender mejor el problema se hace uso de simulaciones, pero aun las simulaciones más confiables necesitan ser validadas con medidas, así que la técnica de medición de perfiles de velocidad ultrasónica (UVP), ofrece una solución a este problema. Además de que resulta ventajosa en la medida en que funciona utilizando un solo sensor, hace mediciones no intrusivas, penetra en suspensiones opacas, tiene una frecuencia de muestreo rápido, entre otras.⁵⁹

Estas son solo algunas de las aplicaciones y mejoras que el proceso experimenta en la actualidad, siempre con el propósito de mejorar la concentración de minerales fuertemente magnéticos, recuperar los minerales más débiles y disminuir el desperdicio que tantas pérdidas ocasionan, todo con el fin de hacer más rentable la industria minera.

⁵⁸ STENERA, Jan; et. al. Evaluation of the applicability of ultrasonic velocity profiling in conditions related to wet low intensity magnetic separation. 2013

⁵⁹ FRANKO, J.; KLIMA, M. Application of ultrasonics to enhance wet-drum magnetic separator performance. 2002. ISSN: 07479182

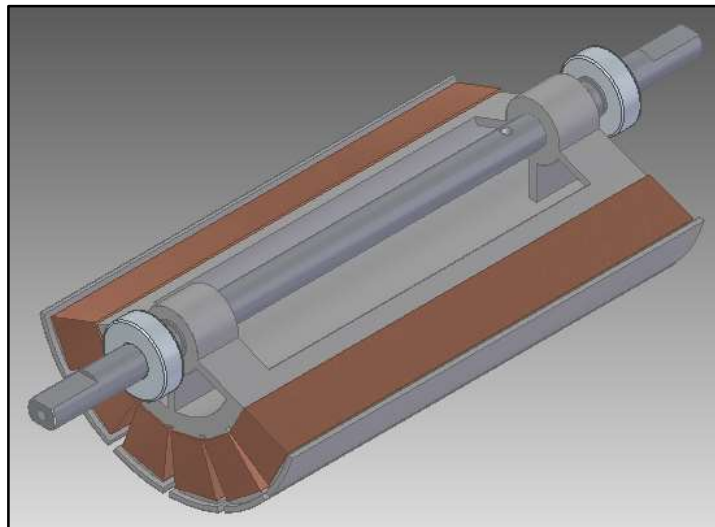
3. DISEÑO DEL SEPARADOR MAGNÉTICO

3.1 PARTES DEL EQUIPO

El separador magnético consta de tres partes principalmente: el sistema magnético, el sistema de alimentación y transporte y el mecanismo de transmisión. Estos sistemas en conjunto permiten la separación del mineral magnético de la ganga y de ellos depende la cantidad y calidad de la recuperación de mineral de hierro.

3.1.1 Sistema Magnético. Es el alma del equipo de separación magnética, ya que, de éste depende, en gran medida, el éxito del proceso de separación. El sistema está compuesto por un arreglo de elementos magnéticos, de forma axial, montados en el interior de un cilindro hueco a modo de tambor. El arreglo magnético se fija al eje, mientras que el tambor se monta sobre dos rodamientos con el propósito de que este pueda girar mientras los imanes permanecen estáticos en el interior. Los elementos magnéticos, en este caso los polos de un electroimán, son energizados por un circuito eléctrico compuesto por bobinas de alambre de cobre esmaltado o alambre magneto, conectadas en serie y alimentadas con c.c.

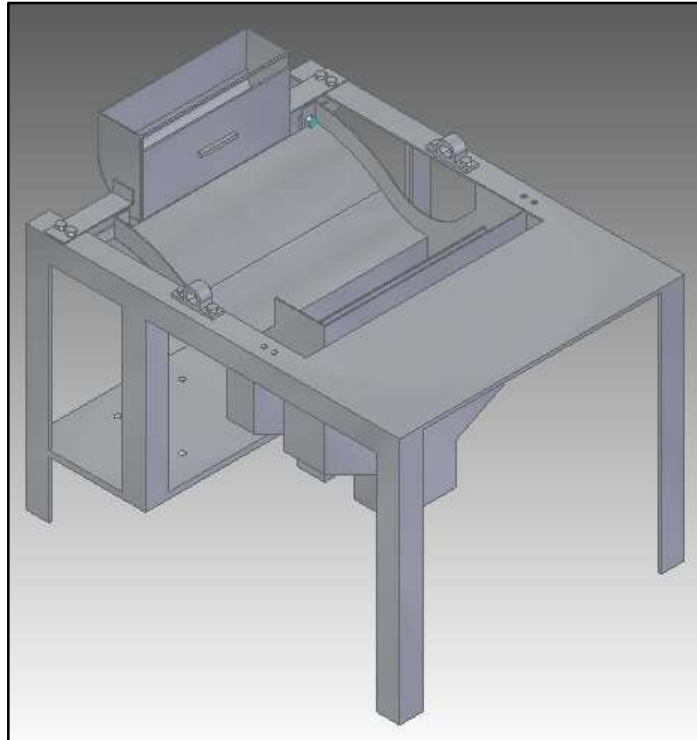
Figura 10. Sistema magnético.



Fuente: Autor.

3.1.2 Sistema de alimentación y transporte. Está formado por el alimentador, que es el elemento por el que ingresa la suspensión, y el canal, que sirve de transporte permitiendo al mineral entrar en contacto con el tambor para su posterior depósito fuera del mismo, y sirviendo así mismo de transporte y desecho de la ganga fuera del equipo.

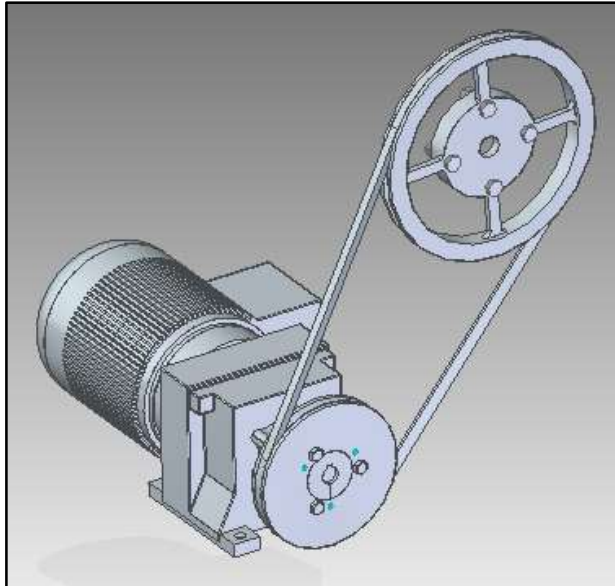
Figura 11. Sistema de alimentación y transporte



Fuente: Autor.

3.1.3 Mecanismo de transmisión. Sistema compuesto por un motorreductor y un par de poleas de transmisión. Este sistema transmite el movimiento rotacional producido por el motorreductor, que reduce la velocidad pero aumenta el par transfiriéndolo a la polea de transmisión que al estar unida al tambor permite la rotación del mismo y por ende la separación del mineral y el funcionamiento del equipo.

Figura 12. Sistema de transmisión.



Fuente: Autor.

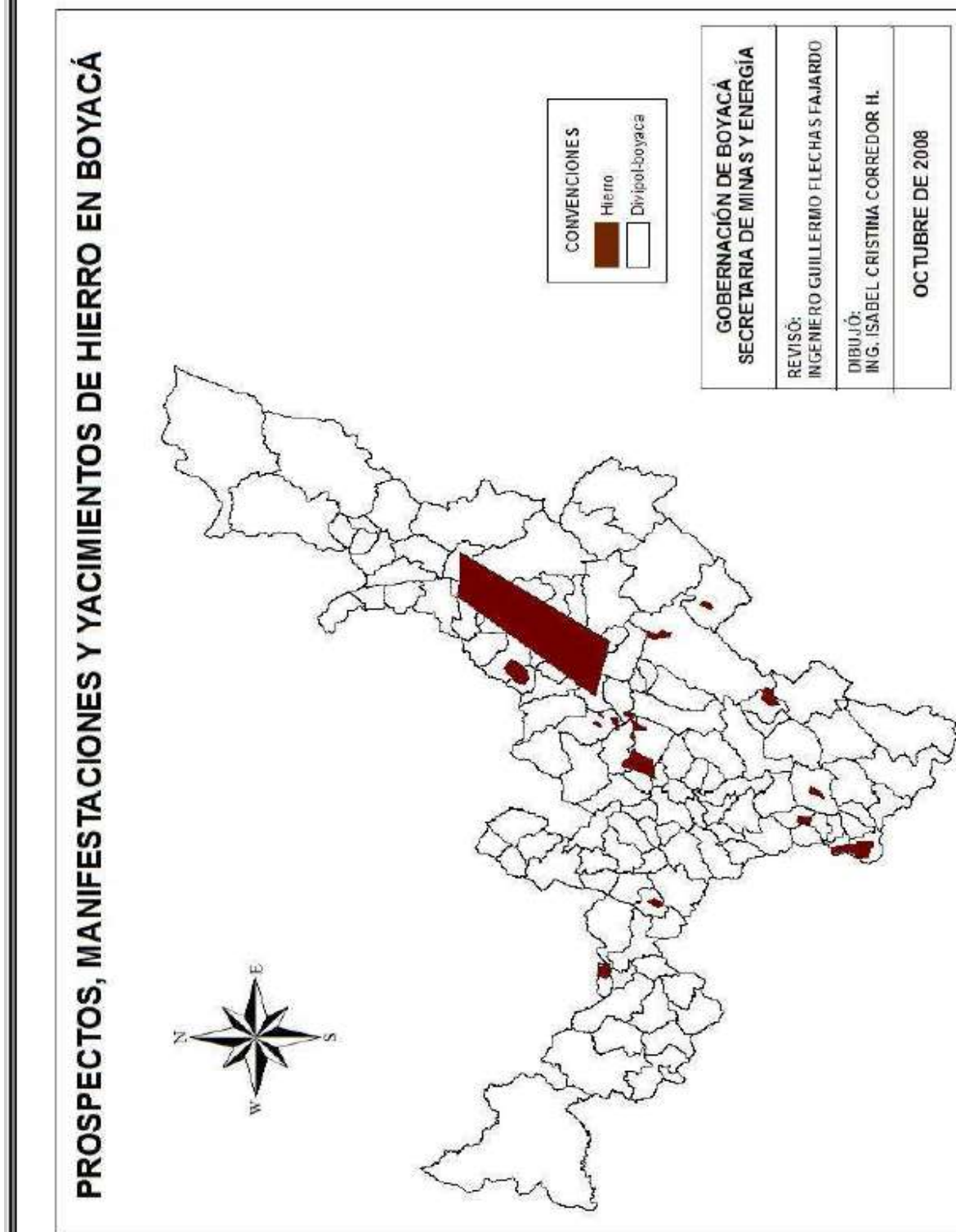
3.2 MINERAL DE HIERRO DE LA REGIÓN DE BOYACÁ⁶⁰

En Boyacá hay importantes manifestaciones y yacimientos de mineral de hierro como se muestra en la figura 13, pero se carece de información relevante y pertinente con respecto a la caracterización del mineral de hierro de la región de Boyacá. Por esto, la información consignada en este apartado es tomada únicamente del trabajo de grado de la UIS (Universidad de Santander) titulado “Estudio de concentración de mineral de hierro por métodos físicos para el proceso de sinterización en acerías Paz del Río S.A.” y se usará como única fuente de información, y el diseño se basará en los datos encontrados en ese trabajo.

Ese trabajo fue realizado para la planta Acerías Paz del Río que es una de las siderúrgicas más importantes del país y extrae el mineral de hierro de minas ubicadas en Boyacá principalmente y Cundinamarca, por lo que es una referencia importante si se requiere información del mineral de hierro la región de Boyacá.

⁶⁰ ALVAREZ R., Lili Y.; ROJAS G., Miler A. Estudio de concentración de minerales de hierro por métodos físicos para el proceso de sinterización en Acerías Paz del Río S.A. Bucaramanga. 2009

Figura 13. Manifestaciones y yacimientos de hierro en Boyacá.



Fuente: Minería en el Departamento de Boyacá (Reseña general).
<http://www.simco.gov.co/portals/0/delegadas/gobboyaca.pdf>

En la realización del estudio se tomaron muestras de las minas de Paz del Rio y Tencua ubicadas en Boyacá y de la mina de Ubala en Cundinamarca, por lo que se tomara en cuenta únicamente lo referente a las minas de Boyacá para la determinación del mineral propio de esta región y sus características.

En las siguientes tablas se presenta la composición química, mineralógica, y las propiedades fisicoquímicas del mineral presente en las minas de Boyacá. Cabe mencionar que para el diseño se tomara en cuenta únicamente el mineral de hierro aquí presentado.

Tabla 2. Composición química de los minerales de estudio.

Mineral (Especie química)	Paz del Rio (%)	Vereda de Tencua (%)
SiO ₂	11,53	16,17
CaO	2,97	1,03
Fe	46,06	44,56
PPC	11,75	-
Al ₂ O ₃	5,63	9
MgO	0,5	0,44
S	0,1	0,009
P	1,15	-
Mn	0,16	0,79
Zn	0,08	-
Na ₂ O	0,08	0,14
K ₂ O	0,04	0,29
H ₂ O	5,13	-

Fuente: ALVAREZ R., Lili Y.; ROJAS G., Miler A. Estudio de concentración de minerales de hierro por métodos físicos para el proceso de sinterización en Acerías Paz del Rio S.A. Bucaramanga. 2009

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de los minerales de estudio.

Tipo de Mineral	Densidad real promedio [kg/m ³]	Humedad [%]	PH promedio
Paz del Rio	2820	32	6
Vereda de Tencua	2660	34	6

Fuente: ALVAREZ R., Lili Y.; ROJAS G., Miler A. Estudio de concentración de minerales de hierro por métodos físicos para el proceso de sinterización en Acerías Paz del Rio S.A. Bucaramanga. 2009

Tabla 4. Composición mineralógica del mineral de Paz del Rio.

Fase	Nombre	Cuantitativo [%]
SiO_2	Cuarzo	2,7
$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	Antigorita	13,7
$FeCO_3$	Siderita	4,9
$\alpha - Fe_2O_3$	Hematita	19,4
$(K, H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_4$	Illita	6,7
$\alpha - FeOOH$	Goethita	21,2
$(Cu_6Zn)(SO_4)_2(OH)_{10}(H_2O)_3$	Schulenbergita	1,4
$MgSiO_3$	Perovskita	0,8

Fuente: ALVAREZ R., Lili Y.; ROJAS G., Miler A. Estudio de concentración de minerales de hierro por métodos físicos para el proceso de sinterización en Acerías Paz del Rio S.A. Bucaramanga. 2009

Tabla 5. Composición mineralógica del mineral de la vereda de Tencua.

Fase	Nombre	Cuantitativo [%]
SiO_2	Cuarzo	13,2
$\alpha - FeOOH$	Goethita	17,9
$\alpha - Fe_2O_3$	Hematita	15,7
$CaCO_3$	Calcita	0,2
$(K, H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_4$	Illita	42,6
TiO_2	Rutilo	1,6
$\gamma - Fe^{3+}O(OH)$	Lepidocrocita	0,9

Fuente: ALVAREZ R., Lili Y.; ROJAS G., Miler A. Estudio de concentración de minerales de hierro por métodos físicos para el proceso de sinterización en Acerías Paz del Rio S.A. Bucaramanga. 2009

En el trabajo de grado de la UIS también se muestra una tabla que lista algunas variedades de mineral de hierro y la inducción magnética requerida para su separación, la cual fue usada como base para el diseño del electroimán.

Esta información se presenta a continuación en la tabla 6.

Tabla 6. Influencia de la intensidad magnética sobre los minerales.

Inducción magnética requerida para la separación [Gauss]	Mineral
500 – 5000	Fuertemente magnéticos. Magnetita, franklinita, leucita, pirrotita.
5000 - 10000	Moderadamente magnéticos. Ilmenita, biotita, granate, wolframita.
10000 - 18000	Débilmente magnéticos. Hematita, columbita, limonita, pirulosita, rodocrosita, siderita, goethita, manganita.
18000 - 23000	Pobrementemente magnéticos. Rutilo, rodonita, dolomita, tantalita, cerusita, epidota, monacita, fergusonita, zircón, cerargirita, argentita, pirita, esfalerita, molibdenita, bornita, wilemita, tetraedrita, scheelita.

Fuente: ALVAREZ R., Lili Y.; ROJAS G., Miler A. Estudio de concentración de minerales de hierro por métodos físicos para el proceso de sinterización en Acerías Paz del Rio S.A. Bucaramanga. 2009

3.3 DISEÑO

En esta sección se presentan las generalidades del proceso de diseño de cada una de las partes, así como la elección de materiales para las mismas. Las medidas específicas y los planos se presentan en el Anexo A.

3.3.1. Selección del tamaño de las partículas de alimentación y porcentaje de sólidos en la suspensión. En teoría, cuando se hace uso de separadores magnéticos por vía húmeda, el tamaño de las partículas sólidas debe ser muy pequeño y el porcentaje de sólidos en la suspensión debe ser menor en relación al de fluido.

Con el fin de encontrar el tamaño de partícula y el mínimo porcentaje de fluido que consigan que la suspensión fluya con facilidad a través del canal de alimentación del separador, se realizaron ensayos de fluidez en los laboratorios de fundición y de preparación mecánica de la UPTC seccional Tunja, al mineral de hierro (magnetita y limonita) disponible en los laboratorios antes mencionados.

Es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos en este aparte servirán como referencia para dimensionar el tambor magnético, pero el porcentaje de sólidos presentes en la suspensión variara con la densidad de los minerales a tratar, por lo que cada carga de material a separar en el equipo debe previamente ser analizada para determinar su composición fisicoquímica y mineralógica y así encontrar la cantidad mínima de agua con la cual podrá fluir fácilmente.

3.3.1.1 Magnetita. La magnetita utilizada inicialmente era una piedra grande, gruesa y pesada, de color amarillo ocre y plateado, con forma irregular que al partirse formaba láminas de piedra. Esto se muestra en la figura 14.

Figura 14. Magnetita grande y gruesa.



Fuente: Autor.

Con el fin de realizar los ensayos era necesario reducirla de tamaño. Primero, y como la piedra era demasiado grande y dura para hacer uso de la trituradora, se golpeó con un mazo hasta conseguir pequeñas piedras de entre 2 y 3 cm de diámetro. Luego, se redujo aún más de tamaño haciéndola pasar por la trituradora de mandíbula, hasta obtener un tamaño aproximado de 5 mm. Finalmente se trituró aún más dando golpes secos con un mazo. Los tamaños obtenidos en las etapas mencionadas se muestran a continuación.

Figura 15. Magnetita triturada.



Fuente: Autor.

Teniendo el mineral bien molido, se seleccionaron tres mallas diferentes, con el propósito de conseguir tres granulometrías diferentes a las cuales realizarles los ensayos. Las mallas seleccionadas se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Características de las mallas seleccionadas.

Malla	Abertura en micras	Abertura en pulgadas
50	300	0.0117
120	125	0.0049
200	75	0.0029

Fuente: Autor

Las muestras obtenidas al tamizar en tres granulometrías diferentes se muestran en la figura 16.

Figura 16. Magnetita tamizada en malla 50, 120 y 200 respectivamente.



Fuente: Autor.

3.3.1.2 Limonita. Mineral de color naranja, menos pesado y más fino que la magnetita, por lo que para prepararlo solo se pasó por la trituradora y se golpeó finalmente con el mazo consiguiendo un tamaño bastante similar al de la magnetita. De igual forma se tamizo con las mismas mallas, para conseguir las mismas granulometrías de la magnetita y trabajar con una mezcla homogénea de los dos minerales. La limonita triturada se muestra en la figura 17, y las muestras obtenidas se pueden observar en la figura 18.

Figura 17. Limonita triturada.



Fuente: Autor.

Figura 18. Limonita tamizada en malla 50, 120 y 200 respectivamente



Fuente: Autor.

3.3.1.3 Ensayos de Fluidez.

- Se busca hacer una suspensión con una porción de mineral y una porción de agua de modo que se encuentre la cantidad mínima de agua necesaria para que la suspensión fluyera completamente arrastrando el mineral.

Con este propósito se mezcló 50 ml de magnetita y 50 ml de limonita, consiguiendo 100 ml de mineral de hierro de cada granulometría, y se añadió una medida de agua cada vez registrando su comportamiento en la siguiente tabla.

Tabla 8. Primer ensayo de fluidez mineral malla 50.

Cantidad de agua (ml)	Observaciones
100	No diluye lo suficiente y el material no fluye, estancándose.
200	Aun no es suficiente, el arrastre es mínimo.
350	El arrastre es mayor, cerca del 40 % del mineral.
500	Arrastra cerca del 60% del mineral.
1000	Fluye casi completamente, dejando un 10% en el fondo.
1300	Fluye completamente, aunque es necesario agitarlo mucho para que se integren y se homogenice la suspensión.

Fuente: Autor.

Como se puede observar la cantidad mínima de agua necesaria para que el mineral fluya es de 1300 ml que añadidos a los 100 ml de la mezcla de mineral forman una suspensión diluida de 1400 ml. Para este caso el porcentaje de sólidos en la suspensión es de 7.14 %.

Con el mineral de mallas 120 y 200 se procede de igual forma, añadiendo cierta cantidad de agua hasta conseguir que fluya completamente.

Es así que para la mezcla de 100 ml mineral de malla 120, se debe añadir por lo menos 600 ml con el fin de que la suspensión fluya sin estancarse, lo que da como resultado una suspensión de 700 ml. En este caso el porcentaje de sólidos resulta ser de 14.3 %.

Al trabajar con los 100 ml de mineral de malla 200, se encontró que es necesario añadir 400 ml de agua como mínimo para conseguir una suspensión diluida y fluida, por lo tenemos una suspensión de 500 ml en total. De esta forma el porcentaje de sólidos será de 20%. En la figura, se muestra las suspensiones realizadas.

Figura 19. Proporción solido-fluido de cada malla de material.



Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede concluir que entre más fino el material, mejor se mezcla con el agua y fluye mejor y más fácil arrastrando completamente el mineral, haciendo que la suspensión se vuelva homogénea más fácilmente. Además, que la cantidad de agua utilizada es menor, lo que es más eficiente en términos de recursos.

Por esto, se aconseja utilizar una suspensión con mineral de hierro de por lo menos $75\ \mu\text{m}$ y un porcentaje de sólidos del 20%. Claro está que el porcentaje de sólidos varía con las propiedades fisicoquímicas del mineral, por lo que no siempre este porcentaje será el más óptimo.

- A continuación, se tomó la suspensión más favorable, que fue la malla 200 y se hizo fluir por una bandeja de 40 cm de largo con una inclinación de 45° , registrando el tiempo que le tomaba, con el fin de encontrar la velocidad de la suspensión. Este proceso se muestra en la figura 20. La suspensión se agitó muy bien para obtener una mezcla homogénea, y se vació con rapidez para permitir que fluyera sin estancarse.

Figura 20. Segundo ensayo de fluidez.



Fuente: Autor

Adicionalmente se registró el tiempo que necesita la suspensión para vaciarse por completo desde recipiente que la contiene hasta otro recipiente, y así determinar el caudal de entrada al canal de alimentación. Cabe aclarar que la suspensión se agito muy bien antes de realizar este procedimiento.

Las mediciones realizadas se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Tiempo que toma la suspensión en recorrer toda la bandeja y en vaciarse del recipiente que la contiene.

Registro	Tiempo en recorrer la bandeja (s)	Tiempo en vaciarse del recipiente que la contiene (s)
1	0.48	2.73
2	0.46	2.58
3	0.5	2.69
4	0.51	2.82
5	0.49	2.81
6	0.53	2.67
Prom.	0.5	2.72

Fuente: Autor.

Entonces, se tiene:

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}} \quad \text{Ec. 20}$$

Lo que permite encontrar el caudal, haciendo uso del volumen de suspensión que se vacía del recipiente y el tiempo promedio que tarda en hacerlo. Así que, siendo $V = 500 \text{ ml} = 500 \text{ cm}^3$ y $t = 0.5 \text{ s}$,

$$Q = 1000 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

Además,

$$Q = Av \quad \text{Ec. 21}$$

Y calculando

$$v = \frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo}} = 14.71 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad \text{Ec. 22}$$

Se puede encontrar así, el área de salida de la suspensión desde el alimentador y con esta, estimar el ancho del tambor.

$$A = 68 \text{ cm}^2$$

Así, y asumiendo que la salida del alimentador tiene forma rectangular, las medidas seleccionadas que cumplen con esta área son, $b = 34 \text{ cm}$ y $h = 2 \text{ cm}$. Por motivos de construcción el alimentador tiene una reducción del ancho a $b = 25,4 \text{ cm}$ por lo que el alto es de $h = 2,7 \text{ cm}$ con el fin de conservar el área de salida de la suspensión, aunque el canal de alimentación conserva los 34 cm de ancho para aumentar la superficie de contacto de las partículas con el tambor y conseguir una mejor separación. Esto se ve más claramente en los planos del alimentador y del canal presentados en el anexo A.

3.3.2 Electroimán. El sistema magnético del separador está compuesto por un electroimán de seis bloques cuyas bobinas se conectan en serie. El diseño se hace tomando como referencia el mineral más débilmente magnético presente en la región de Boyacá (Goethita), es decir, aquel cuya susceptibilidad magnética es

menor; y según la tabla 6 presentada anteriormente, para esto se necesita generar una intensidad magnética de 18000 Gauss (1,8 T) como máximo.

Los imanes permanentes que poseen las mejores propiedades magnéticas son los imanes de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB) y raramente generan una intensidades magnéticas mayores a 1,4 T, por lo que el electroimán es una mejor opción en caso de que se requiera generar una intensidad mucho mayor, como es el caso, donde se requieren cerca de 2 T.

3.3.2.1 Material del núcleo. El material más ampliamente utilizado como núcleo magnético en los electroimanes es el hierro, debido a que su valor de saturación es alto, sobrepasando incluso las 2 T, y aumentando con la pureza del hierro, es decir, cuanto más libre de impurezas este el hierro más alto será el campo magnético aplicado antes de que el material alcance la saturación.

3.3.2.2 Dimensiones del núcleo del electroimán. Teniendo en cuenta el ancho del canal de alimentación se dimensiona el ancho del modelo del núcleo magnético. Para encontrar el diámetro del tambor se debe considerar que entre más bobinas se puedan encajar en el espacio disponible mucho mejor, pues dan mayor y mejor cobertura al espacio de influencia, además de acercarse mucho más a la curvatura del tambor reduciendo el entrehierro; asimismo deben ser bajos para evitar en gran medida la dispersión del campo magnético generado por las bobinas, pero considerando que un electroimán es más efectivo cuando el ancho de la bobina es menor que la medida de la altura⁶¹.

Es así que se considera que el diámetro del tambor debe ser de 20 cm, atendiendo a las consideraciones de tamaño antes mencionadas y sabiendo que el núcleo tiene forma de abanico lo que limita el espacio disponible para la ubicación de las bobinas. Las dimensiones finales del modelo se presentan en el plano del electroimán ubicado en el anexo A.

El electroimán se diseñó haciendo uso del software ANSYS Multiphysics más específicamente el módulo Magnetostatic, que permite modelar el núcleo magnético y las bobinas en un software CAD, en este caso se utilizó Solid Edge ST6, para

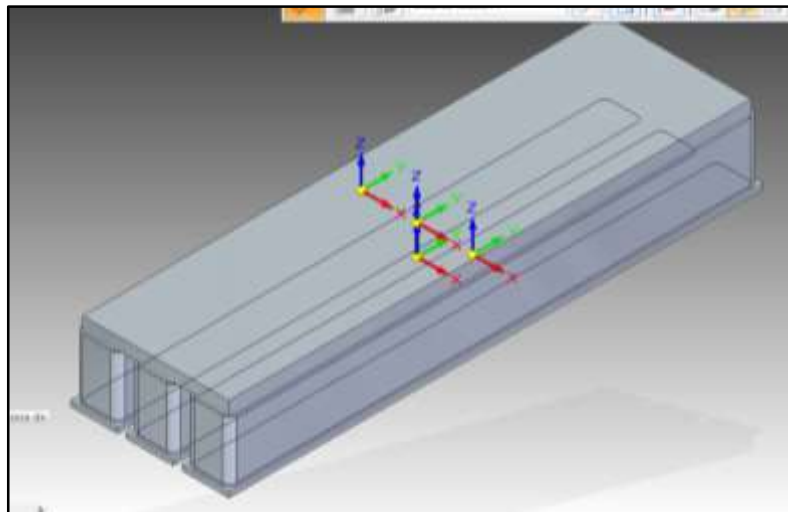
⁶¹ ALVAREZ, Manuel. Nociones básicas de electromagnetismo. En: Electroimanes. España: Ed. Club Universitario. 2012. p. 82. ISBN 978-84-9948-989-6.

luego al importar la geometría a ANSYS, simular el comportamiento de las bobinas sobre el núcleo y así determinar la inducción magnética que se puede generar con el electroimán.

Se realizó la simulación de únicamente 3 bobinas, ya que la asignación de coordenadas debía hacerse para cada una de las partes de la bobina, estando esta dividida en 8 partes, lo que hacía que la simulación se tornara muy lenta en tanto más bobinas tuviera. Además, el comportamiento magnético se puede observar muy claramente haciendo uso únicamente de estas 3 bobinas, lo que resulta suficiente para el diseño del tambor, que necesita de 6 bobinas para cubrir el espacio de influencia magnética que requiere el proceso.

La geometría del núcleo debía ser lineal para que al importarla a ANSYS, este permitiera la asignación de los sistemas coordenados en cada sección de cada una de las bobinas, que servirían de guía para la dirección de la corriente en las mismas. La geometría del conjunto núcleo-bobina se muestra en la figura 21.

Figura 21. Geometría del conjunto núcleo-bobina.

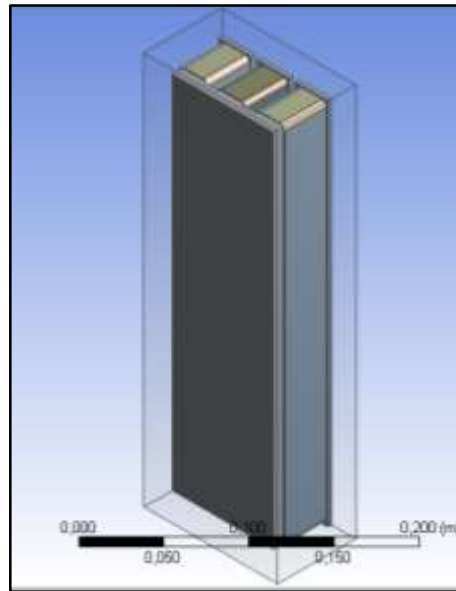


Fuente: Autor.

Posteriormente se importó la geometría a Ansys, verificando que el eje de las bobinas sea el eje z, con el fin de facilitar la asignación de los sistemas coordenados. Además se cercó el conjunto con el propósito de tener en cuenta las proximidades al electroimán cuando este se simula.

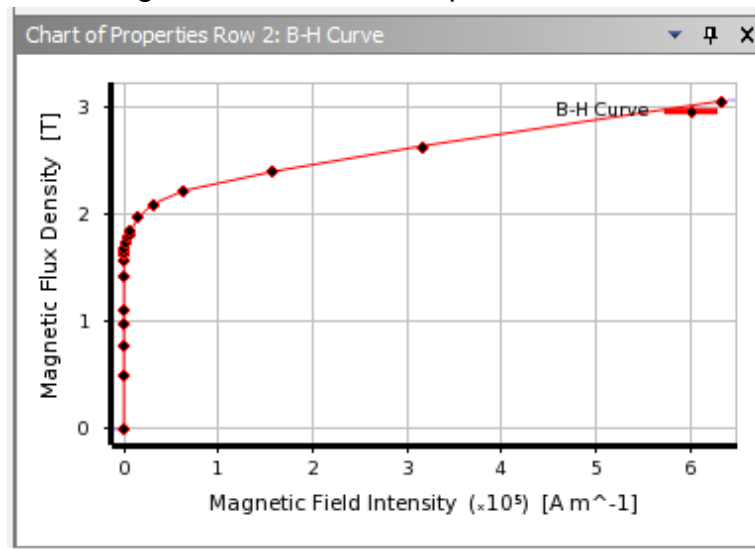
Acto seguido se asignó materiales al conjunto magnético, los cuales fueron extraídos de las librerías de ANSYS. El material utilizado para el núcleo fue hierro puro recocido (pure iron annealed) y para el alambre de la bobina se utilizó aleación de cobre (copper alloy).

Figura 22. Geometría importada y cercado en ANSYS



Fuente: Autor.

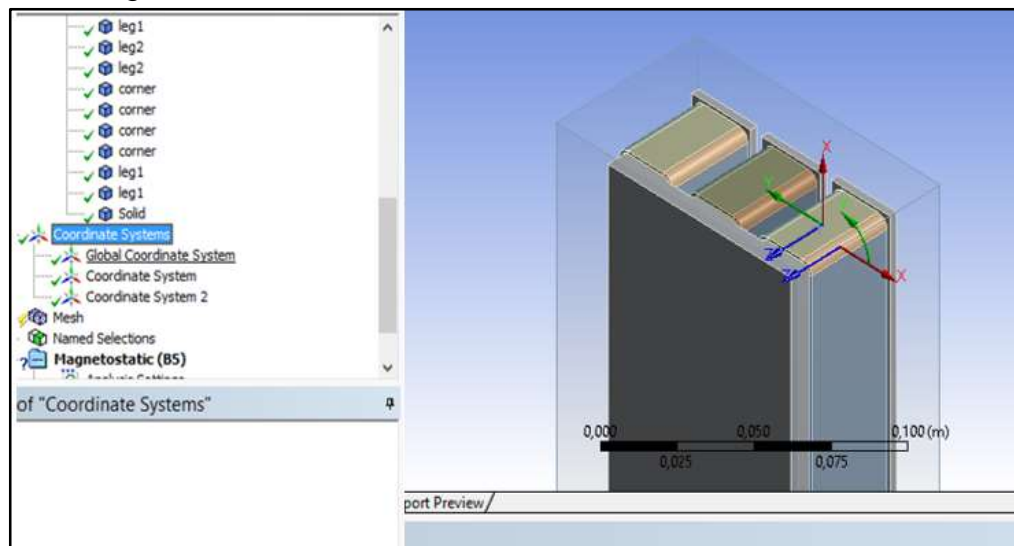
Figura 23. Curva de magnetización del hierro puro recocido.



Fuente: Librería de materiales Ansys.

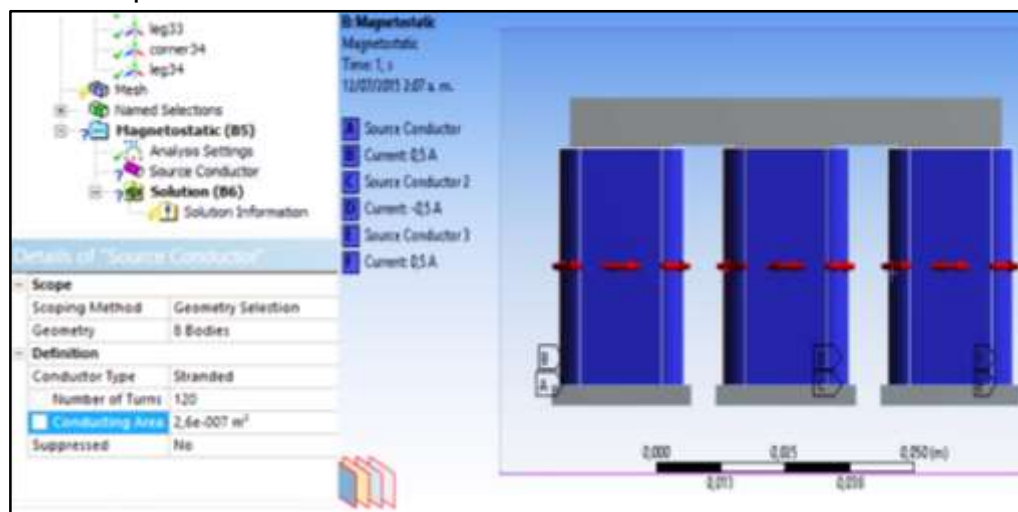
Luego se asignaron los sistemas coordenados, uno para cada una de las secciones de la bobina, que sirvieron para especificar la dirección de la corriente. Se asignaron las propiedades del conductor y la corriente que por él circula, para el caso se utilizó el catálogo de Procables, que se presenta en el Anexo B, seleccionando alambre magneto calibre 24 que tiene una capacidad de corriente de 2 A. La corriente utilizada en la simulación fue de 0,5 A en corriente continua.

Figura 24. Asignación de sistemas coordenados.



Fuente: Autor.

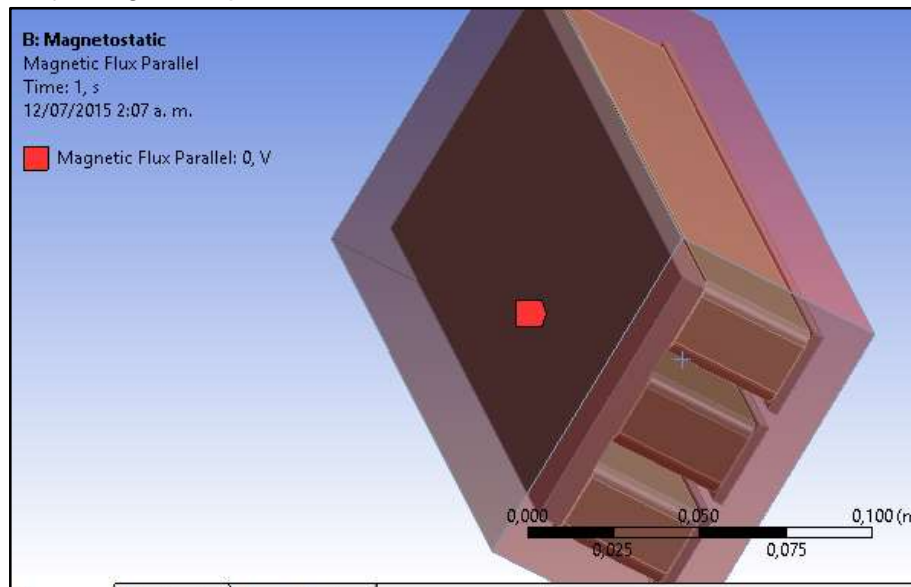
Figura 25. Propiedades del conductor.



Fuente: Autor.

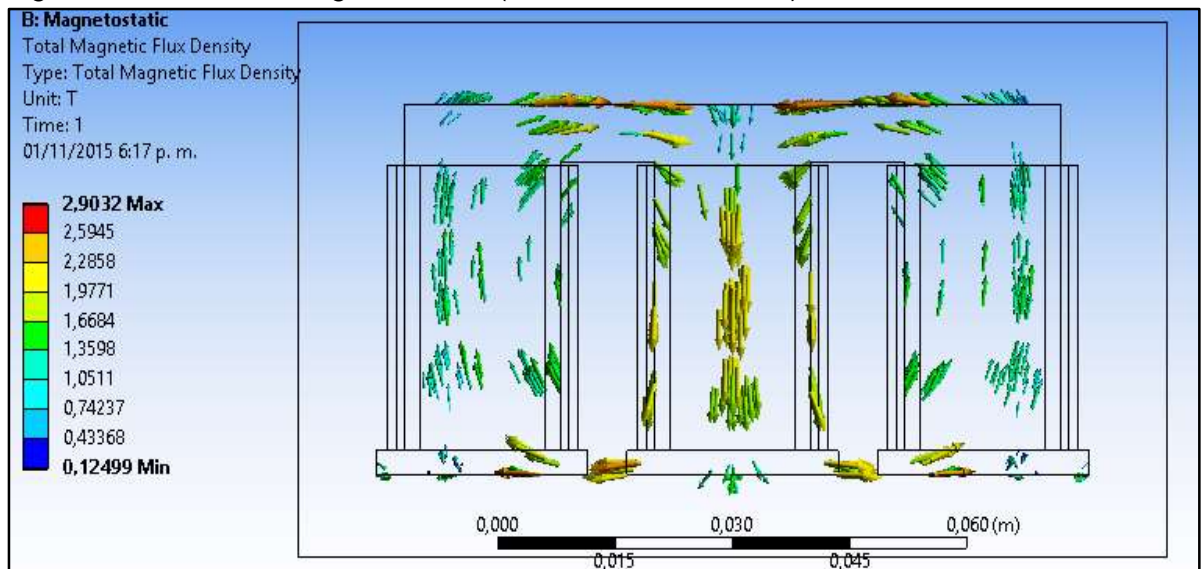
Además se asignó un flujo magnético paralelo como condición de frontera al cercado de caja. Posteriormente ANSYS resolvió, enmallando en primera medida para luego determinar la densidad de corriente y la intensidad magnética total del conjunto, obteniendo los siguientes resultados.

Figura 26. Flujo magnético paralelo.



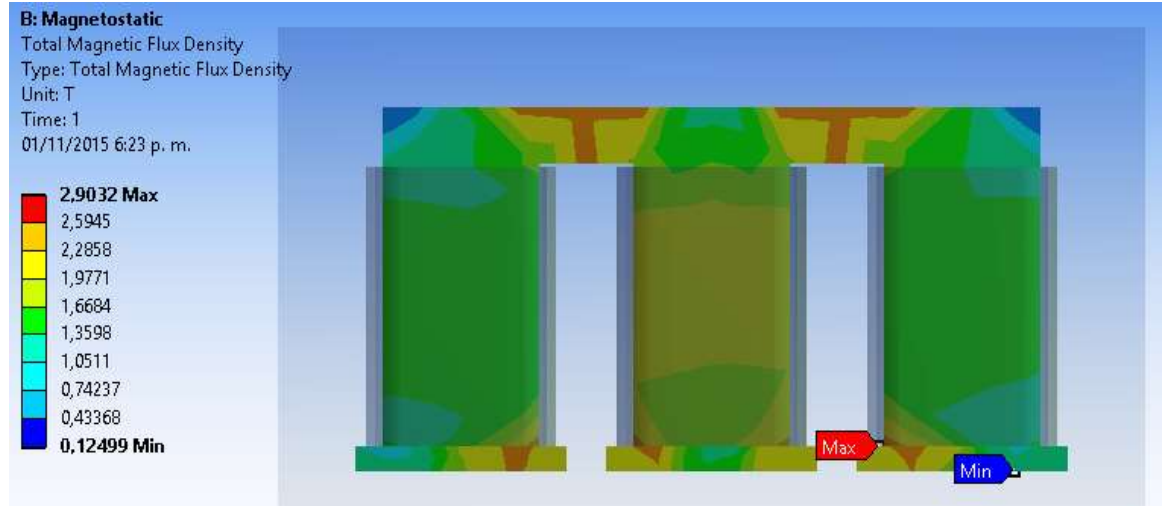
Fuente: Autor.

Figura 27. Intensidad magnética total (visualización vectorial).



Fuente: Autor.

Figura 28. Intensidad magnética total (visualización min y max).



Fuente: Autor.

Se puede observar que electroimán genera un poco más de 2 T, por lo que, por ahora, se considera que posee capacidad suficiente para concentrar el mineral de hierro con la susceptibilidad más baja y por ende, las demás variedades de este mineral presentes en la región de Boyacá.

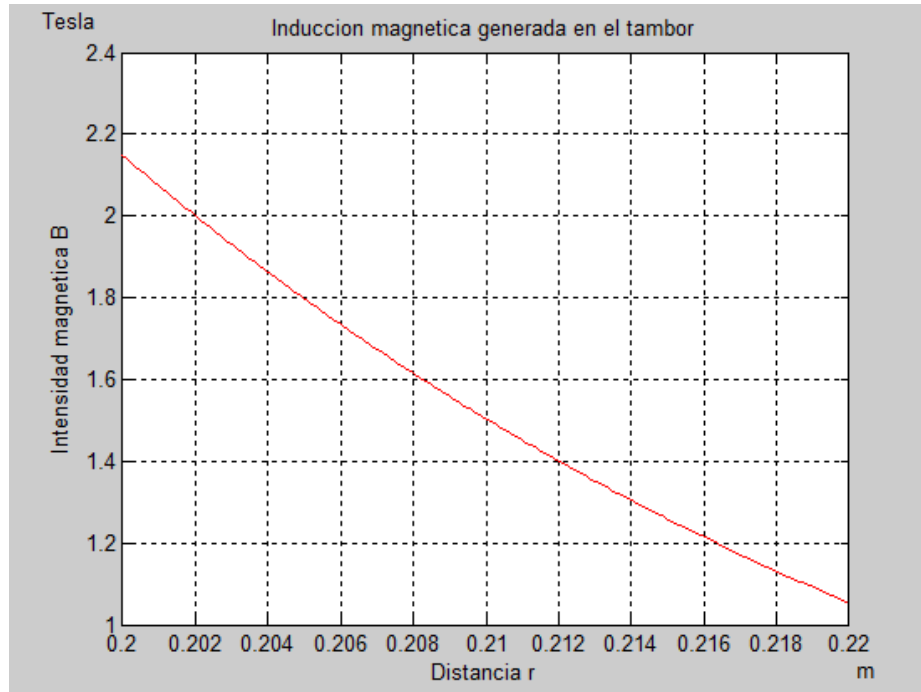
Se realizó la simulación del proceso magnético mostrando el comportamiento de la inducción magnética con la variación de la distancia de separación entre las partículas y el tambor. Para esto se trabajó con el software Matlab para encontrar las gráficas de los comportamientos mencionados. El código utilizado y las gráficas resultantes se presentan a continuación.

Figura 29. Código Matlab.



Fuente: Autor.

Figura 30. Inducción magnética producida por el electroimán.

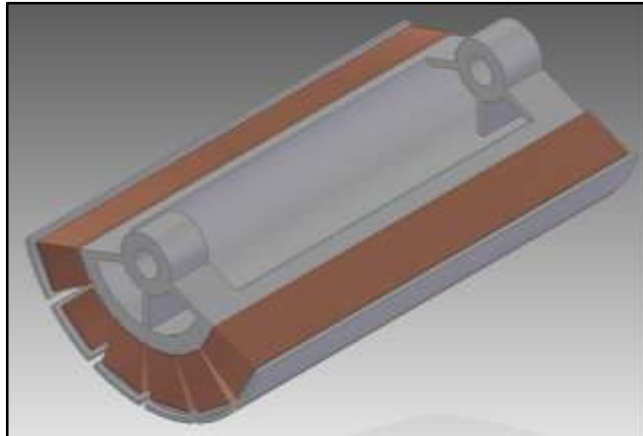


Fuente: Autor.

La distancia tomada en cuenta para construir la gráfica de la figura 30 es una distancia arbitraria pequeña para analizar el comportamiento y tomar una decisión en cuanto a la separación del canal y el tambor, determinando así que lo más conveniente es que sea de 1 cm. Esta distancia es pequeña con el propósito de aumentar la eficiencia de separación con la premisa de que la inducción magnética disminuye con el aumento de la distancia debido a la reluctancia del aire. Todo esto se puede corroborar en la gráfica, ya que se puede observar claramente como la inducción magnética cae considerablemente con un pequeño aumento en la distancia de separación.

En base al modelo utilizado para la simulación, se modeló el electroimán que hará parte del diseño final adaptándolo a la forma del tambor por lo que su forma será curva, además, de añadir más polos debido a la necesidad de ampliar la superficie magnética en contacto con el mineral, como se ve en la figura 31. Las medidas no variaron de forma considerable con el fin de mantener los resultados de la simulación.

Figura 31. Electroimán.



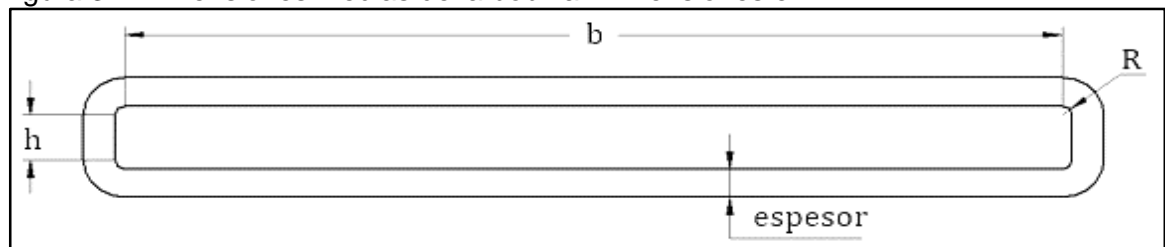
Fuente: Autor.

En cuanto a la bobina, esta está compuesta por 120 vueltas de alambre de cobre esmaltado, los cuales se pueden devanar directamente sobre el núcleo o sobre un carrete superpuesto en el núcleo.

Teniendo en cuenta que al circular una corriente continua a través de una bobina, ésta se comporta como un hilo conductor y ofrece a su paso una resistencia que depende del material del conductor, la tensión necesaria para alimentar el circuito de bobinas conectadas en serie se halla haciendo uso de la ley de Ohm.

Teniendo en cuenta las dimensiones medias de la bobina podemos encontrar la longitud media de la misma, que será utilizada para hallar la resistencia de cada bobina. Las dimensiones se muestran en la figura 32, exagerando el espesor de la bobina para poder apreciarlo mejor. El arrollamiento está compuesto por 120 vueltas de alambre dispuestas en dos capas de 60, es decir, primero se arrollan 60 vueltas de alambre sobre el polo magnético y luego se arrollan las siguientes 60 sobre las primeras, resultando en dos capas de 60 vueltas.

Figura 32. Dimensiones medias de la bobina. Dimensiones en mm.



Fuente: Autor.

Donde,

$$b = 296 \text{ mm}$$

$$h = 16 \text{ mm}$$

$$R = 3 \text{ mm}$$

$$N_{vueltas} = 120$$

$$D_{alambre} = 0,577 \text{ mm}$$

espesor = 1,16 mm compuesto por las dos capas de alambre, cada una de espesor $D_{alambre}$.

La longitud media está dada por:

$$L_{media} = (2bN_{vueltas}) + (2hN_{vueltas}) + \left[\frac{N_{vueltas}}{2} (R + D_{alambre}) \right] + \left[\frac{N_{vueltas}}{2} (R + 2D_{alambre}) \right] \quad \text{Ec. 23}$$

Es así que:

$$L_{media} = 77,795 \text{ m} = 0,0778 \text{ km}$$

$$R = R_{alambre} * L_{media} \quad \text{Ec. 24}$$

Para el alambre magneto calibre 24, $R_{alambre}$ a $20^\circ\text{C} = 84,07 \Omega/\text{km}$, entonces, $R = 6,54 \Omega$.

Para seis bobinas conectadas en serie $R = 39,24 \Omega$. La tensión eléctrica necesaria para alimentar las seis bobinas, por las cuales circula una corriente de 0,5 A es de 19,63 V.

3.3.3 Fuente de alimentación. El equipo necesita una fuente de alimentación que proporcione 20 V y 0,5 A, por lo que se selecciona una fuente de alimentación regulable DC Lavolta Lab BPS-305 con un rango de voltaje de 0-30 V y un rango de corriente de 0-5 A, con alta confiabilidad y precisión y bajos niveles de ruido.

Figura 33. Fuente de alimentación regulable Lavolta Lab BPS-305.



Fuente: Lavolta Bps305 Variable Linear Dc Power Supply 0 - 30v / 0 - 5a - Regulated Adjustable. <http://www.uijts.com/lavolta-bps305-variable-linear-dc-power-supply-0-30v-0-5a-regulated-adjustable-lab-kit-with-alligator-leads-33672.html>

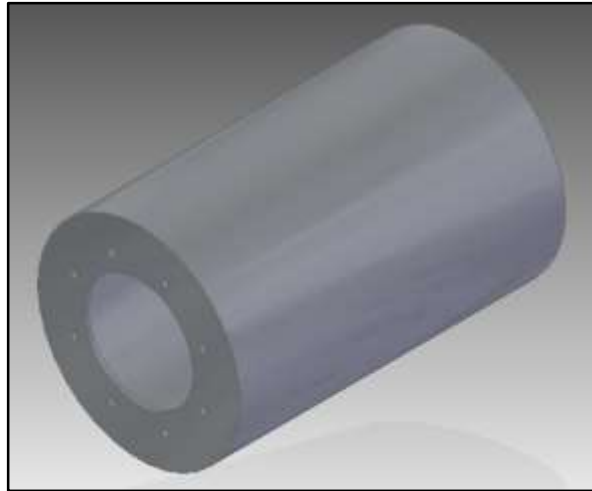
3.3.4 Tambor. Está compuesto por una lámina de acero inoxidable, que recubre el electroimán formando un cilindro, al cual se unen con soldadura, en el borde interior, dos placas circulares delgadas con 8 perforaciones cada una para la ubicación de los tornillos que ajustan las dos tapas con el fin de mantener cerrado completamente el tambor. Este se ubica sobre dos rodamientos con el fin de permitir su rotación sobre el eje fijo. La tapa delantera cuenta además con 4 perforaciones adicionales para la unión de la polea. En las figuras 34 y 35 se muestran los modelos del tambor y las tapas.

El material elegido para todas las piezas del tambor es el acero inoxidable SAE 304 debido a que es un acero inoxidable austenítico aleado con cromo, níquel y bajo contenido de carbono lo que le da buena resistencia a la corrosión, no es templable ni magnético, además de que puede ser soldable por técnicas convencionales de soldadura por fusión y resistencia. Todo esto lo hace ideal para este propósito teniendo en cuenta que el tambor estará sometido a fuerzas magnéticas atractivas y se encontrará en contacto con medios corrosivos como el agua y el ambiente.

La soldadura al acero inoxidable se realiza con electrodo E308L-16 que tiene alta resistencia a la corrosión intergranular y su escoria es de fácil remoción. Todas las características de este electrodo se presentan en el anexo B.

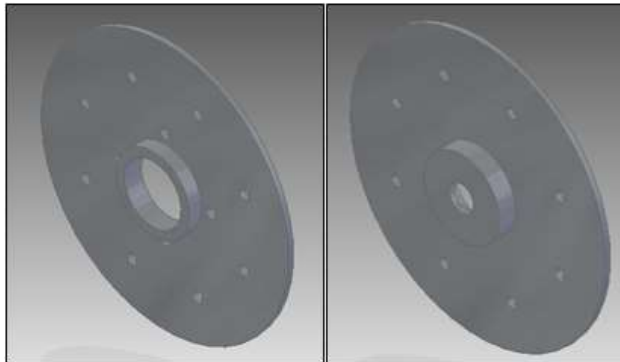
Los tornillos y las tuercas que unen el cilindro con las tapas deben ser, de igual forma, de acero inoxidable debido a su cercanía con el circuito magnético.

Figura 34. Tambor.



Fuente: Autor.

Figura 35. Tapa delantera y trasera.



Fuente: Autor.

3.3.5 Eje. En este caso el eje es fijo, teniendo en cuenta que el electroimán debe permanecer estático y el elemento que rota es el tambor, por lo que el eje se diseñó como si se tratara de una viga simplemente apoyada, donde el eje está sometido únicamente a esfuerzos de flexión.

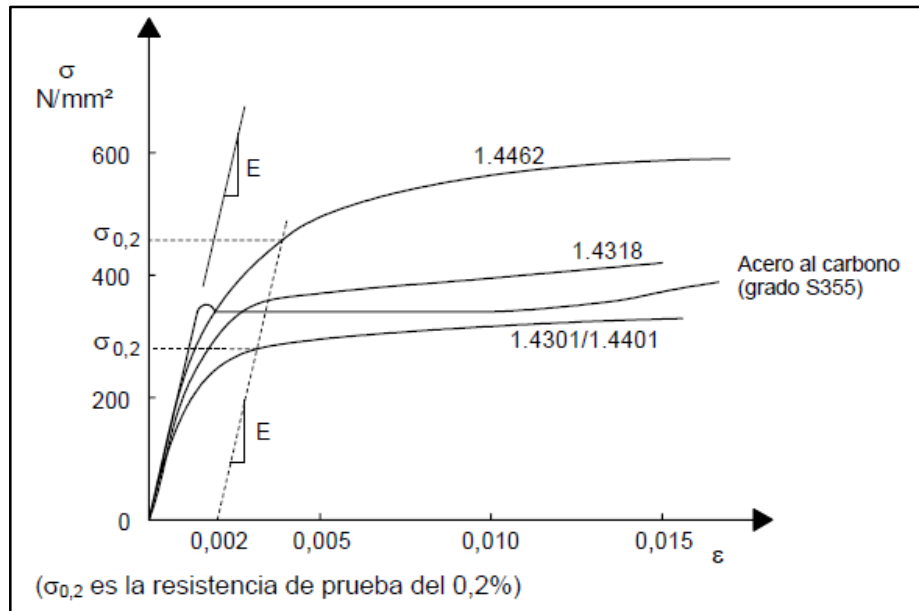
El eje es un cilindro hueco, debido a que el tambor debe estar totalmente sellado con el fin de evitar contaminar el electroimán que se encuentra en el interior del tambor, por lo que para alimentar el electroimán es necesario crear una conexión entre el interior y el exterior. Los extremos de las bobinas se conectan, por medio de una bornera, a cables aislados que entran al eje por un agujero en la superficie del mismo y salen por un extremo del eje para conectarse a la fuente de

alimentación. El eje a diseñar es de acero inoxidable austenítico 304, debido a las propiedades no magnéticas del material, pero la utilización del mismo conlleva algunos inconvenientes a la hora de su dimensionamiento.

La curva tensión-deformación del acero inoxidable presenta una forma más redondeada y sin un límite elástico definido, en comparación a la del acero común⁶² como se muestra en la figura 36. Esta no linealidad complica considerablemente el cálculo preciso de ejes, siendo necesario recurrir a herramientas de análisis no lineal que dificultan el diseño, especialmente en estructuras que se someten a tensiones próximas al límite elástico.⁶³

Generalmente, y ya que no tiene un límite elástico definido, este se expresa en términos de una resistencia de prueba definida para un determinado valor de deformación remanente (convencionalmente, una deformación del 0,2%).⁶⁴

Figura 36. Curvas tensión-deformación típicas para el acero inoxidable y el acero al carbono en la condición de recocido.



Fuente: EURO INOX, STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE. Manual de diseño para acero inoxidable estructural. Pág., 17.

⁶² EURO INOX, STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE. Manual de diseño para acero inoxidable estructural. 2006. Pág., 16.

⁶³ REAL SALADRIGAS, Esther. Aportaciones al estudio del comportamiento a flexión de estructuras de acero inoxidable. Capítulo 9. Conclusiones. Barcelona. 2001. Pág., 188.

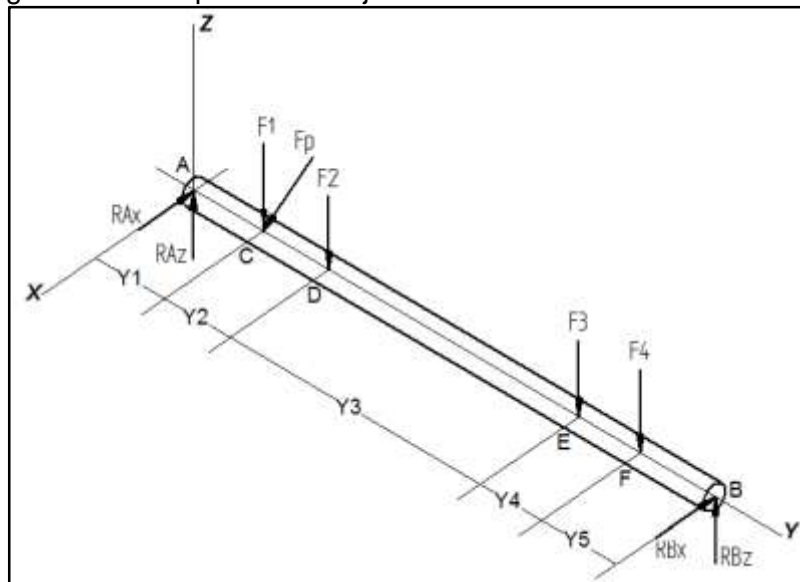
⁶⁴ EURO INOX, STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE. Op. cit., p. 16.

Ya que la curva tensión-deformación no es lineal, el uso de un único valor de E (módulo de elasticidad) tiende a sobreestimar los cálculos obteniendo dimensionamientos conservadores. Aun así, la aplicación de este método, que considera un único valor de E a lo largo de todo el elemento, es recomendable para calcular ejes de hasta valores de carga cercanos al 60% de la carga para la cual la tensión en la fibra más alejada alcanza el valor del límite elástico.⁶⁵

Por lo anteriormente mencionado, el dimensionamiento del eje se realiza con el análisis de deflexión, ya que, en este caso es más importante minimizar las deflexiones que puedan ocasionar desalineamientos indeseables en los rodamientos e interferencias con las partes móviles, y por ende un mal funcionamiento del equipo. El análisis de esfuerzos se hace seguidamente para comprobar que el esfuerzo máximo debido a flexión no sobrepase el 60% del límite del material, como se indicó anteriormente.

En la figura 37 se presenta un diagrama de cuerpo libre del eje. Con el fin de determinar las reacciones en los extremos se hace dos cálculos, uno en el eje YZ y otro en el eje XY , como se muestra en la figura 38 y 39. La fuerza ejercida por la polea en el eje forma un ángulo menor a 90° con la horizontal, por lo que tendrá una componente en cada uno de los cálculos.

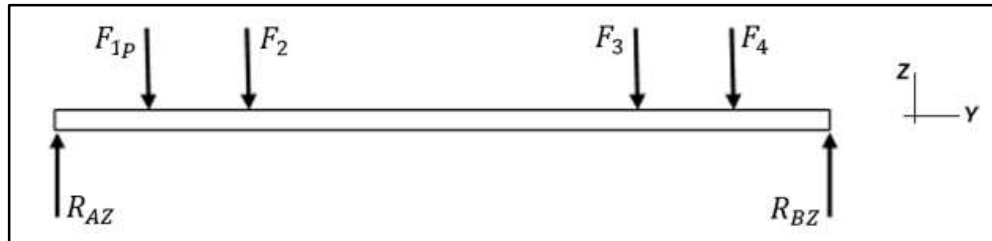
Figura 37. Diagrama de cuerpo libre del eje.



Fuente: Autor.

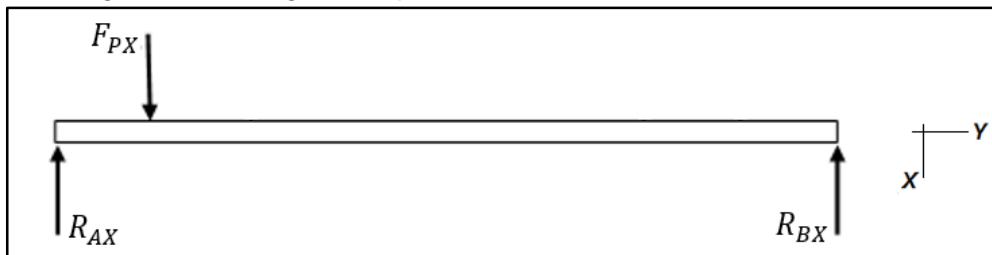
⁶⁵ REAL SALADRIGAS, Esther. Op. cit., p. 189.

Figura 38. Diagrama de la viga en el plano YZ.



Fuente: Autor.

Figura 39. Diagrama de la viga en el plano XY.



Fuente: Autor.

Del modelo CAD podemos obtener una masa aproximada de cada uno de los elementos asociados al eje, basadas en el material de modelado, las cuales se muestran en la tabla 10. Adicionalmente en la tabla 11 se presentan otros datos importantes como distancias y radios, necesarios para el cálculo del diámetro del eje.

La velocidad angular elegida es de 100 rpm, teniendo en cuenta que el proceso da mejores resultados si se usan velocidades angulares bajas, pues disminuye la influencia de la fuerza centrífuga y favorece la separación. Si bien las velocidades que manejan los separadores industriales es mucho menor, también hay que tener en cuenta que entre menor velocidad más costoso será el motor, por lo que atendiendo a los requerimientos de velocidad baja y economía, se elige trabajar con 100 rpm.

Tabla 10. Masa de los elementos asociados al eje.

Elemento	Masa [kg]
Electroimán	16,922
Bobina (cada una)	0,235
Tambor	4,640
Tapa delantera	1,046
Tapa trasera	1,117
Polea	1,663

Fuente: Autor.

Tabla 11. Otros datos asociados al cálculo del eje.

Parámetro	Valor
Longitud Y_1	0,0633 m
Longitud Y_2	0,0245 m
Longitud Y_3	0,29 m
Longitud Y_4	0,0245 m
Longitud Y_5	0,0543 m
Longitud total L	0,4566 m
Radio del tambor R_{tambor}	0,101 m
Radio de la polea R_{polea}	0,1 m
$R_{interno}$ tapa delantera	0,0235 m
$R_{externo}$ tapa delantera	0,101 m
$R_{interno}$ tapa trasera	0,01 m
$R_{externo}$ tapa trasera	0,101 m
Velocidad angular del tambor ω	10,47 rad/s (100 rpm)

Fuente: Autor.

El par necesario para vencer la inercia y hacer girar el tambor está dado por:

$$T = I\alpha \quad \text{Ec. 25}$$

Donde I es el momento de inercia del tambor y las tapas y α la aceleración angular del motor.

$$I_{tambor} = m_{tambor} R_{tambor}^2 = 0,0473 \text{ kg.m}^2 \quad \text{Ec. 26}$$

$$I_{tapadel} = \frac{1}{2} m_{tapadel} (R_{int}^2 + R_{ext}^2) = 0,0056 \text{ kg.m}^2 \quad \text{Ec. 27}$$

$$I_{tapatras} = \frac{1}{2} m_{tapatras} (R_{int}^2 + R_{ext}^2) = 0,0058 \text{ kg.m}^2 \quad \text{Ec. 28}$$

La aceleración angular α esta dada por:

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \quad \text{Ec. 29}$$

Se espera que el motor llegue a la velocidad nominal en la primera vuelta por lo que,

$$t = \frac{\omega}{\theta} = 1,666 \text{ s}$$

Así que,

$$\alpha = 6,28 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$T = 0,369 \text{ N.m}$$

El par que actúa sobre la polea también depende de la potencia transmitida y la velocidad angular a la que gira el tambor, así:

$$T = \frac{P}{\omega} \quad \text{Ec. 30}$$

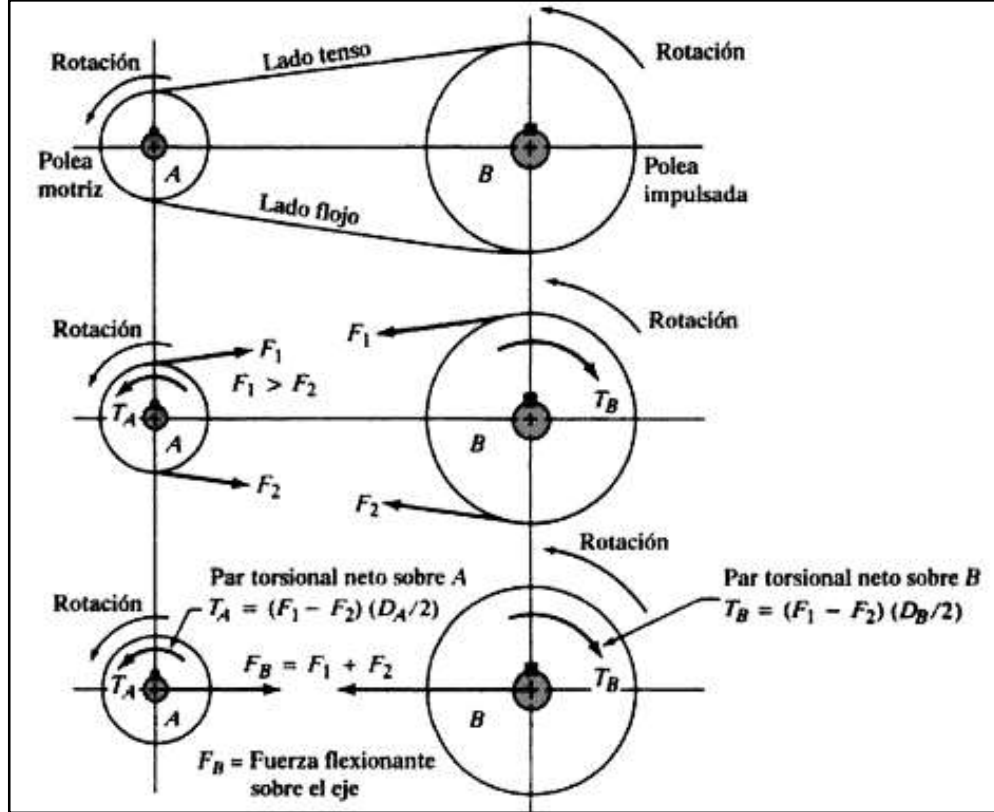
De esta manera, es posible encontrar el valor de la potencia transmitida por el motor:

$$P = T\omega \quad \text{Ec. 31}$$

$$P = 3,86 \text{ W} = 0,0052 \text{ HP}$$

Ahora es necesario calcular la fuerza que ejerce la polea sobre el eje con el fin de realizar un análisis de flexión en el eje.

Figura 40. Fuerzas sobre las poleas.



Fuente: MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. Pag 539.

Como se ve en la figura 40, la tensión F_1 en el lado tenso es mayor que la tensión F_2 en el lado flojo, por lo que la fuerza impulsora neta es

$$F_N = F_1 - F_2 \quad \text{Ec. 32}$$

Que también puede calcularse haciendo uso del par torsional transmitido, así

$$F_N = \frac{T}{D/2} \quad \text{Ec. 33}$$

De igual manera la fuerza flexionante en el eje está dada por la ecuación 34,

$$F_B = F_1 + F_2 \quad \text{Ec. 34}$$

Se establece una relación entre F_N y F_B , donde C es una constante, así

$$F_B = C F_N \quad \text{Ec. 35}$$

$$C = \frac{F_B}{F_N} = \frac{F_1 + F_2}{F_1 - F_2} \quad \text{Ec. 36}$$

Para transmisiones en bandas se supone normalmente que

$$\frac{F_1}{F_2} = 5 \quad \text{Ec. 37}$$

De esta manera, $F_1 = 5F_2$, y reemplazando en la ecuación 36 tenemos que,

$$C = \frac{F_1 + F_2}{F_1 - F_2} = \frac{5F_2 + F_2}{5F_2 - F_2} = \frac{6F_2}{4F_2} = 1,5 \quad \text{Ec. 38}$$

Así, la ecuación 35 se convierte en

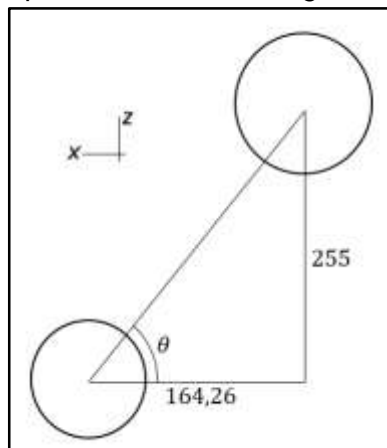
$$F_B = 1,5F_N = \frac{1,5T}{D/2} \quad \text{Ec. 39}$$

Ahora, para facilitar los cálculos posteriores, F_B será renombrada como F_p ya representa la fuerza flexionante que ejerce la polea en el eje, así que

$$F_B = F_p = 5,535 \text{ N}$$

Pero F_p se aplica sobre el eje con un ángulo θ que será necesario conocer para realizar el análisis. Las distancias mostradas en la figura 41 que sirven para el cálculo del ángulo θ son tomadas del modelo CAD de la máquina.

Figura 41. Diagrama de poleas para el cálculo del ángulo θ (ángulo de aplicación de F_p).



Fuente: Autor.

$$\tan \theta = \frac{255}{164,26}$$

$$\theta = 57,21^\circ$$

Ahora podemos calcular las componentes de la fuerza F_p .

$$F_{px} = \cos \theta \cdot F_p \quad \text{Ec. 40}$$

$$F_{px} = 3 \text{ N}$$

$$F_{pz} = \sin \theta \cdot F_p \quad \text{Ec. 41}$$

$$F_{pz} = 4,65 \text{ N}$$

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se analiza la viga en los dos planos para encontrar el momento máximo.

- Primer análisis: Plano YZ.

$$F_1 = \left(\frac{m_{tambor}}{2} + m_{tapa} + m_{polea} \right) g \quad \text{Ec. 42}$$

$$F_1 = 49,334 \text{ N}$$

$$F_{1p} = F_1 + F_{pz} = 53,984 \text{ N}$$

$$F_2 = \left(\frac{m_{electroiman}}{2} \right) g \quad \text{Ec. 43}$$

$$F_2 = 18,332 \text{ N} = F_3$$

$$F_4 = \left(\frac{m_{tambor}}{2} + m_{tapa2} \right) g \quad \text{Ec. 44}$$

$$F_4 = 33,717 \text{ N}$$

Ecuaciones de Equilibrio:

$$\sum F_z = 0 = R_{AZ} - F_{1p} - F_2 - F_3 - F_4 + R_{BZ} \quad \text{Ec. 45}$$

$$R_{AZ} + R_{BZ} = F_{1p} + F_2 + F_3 + F_4$$

$$R_{AZ} + R_{BZ} = 124,365$$

$$\begin{aligned} \sum M_A = 0 = & -F_{1p}Y_1 - F_2(Y_1 + Y_2) - F_3(Y_1 + Y_2 + Y_3) - F_4(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) \\ & + R_{BZ}(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5) \end{aligned} \quad \text{Ec. 46}$$

$$\begin{aligned} C = Y_1 = 0,0633 \text{ m} \quad D = Y_1 + Y_2 = 0,0878 \text{ m} \quad E = Y_1 + Y_2 + Y_3 = 0,3778 \text{ m} \\ F = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 = 0,4023 \text{ m} \quad B = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 = 0,4566 \text{ m} \end{aligned}$$

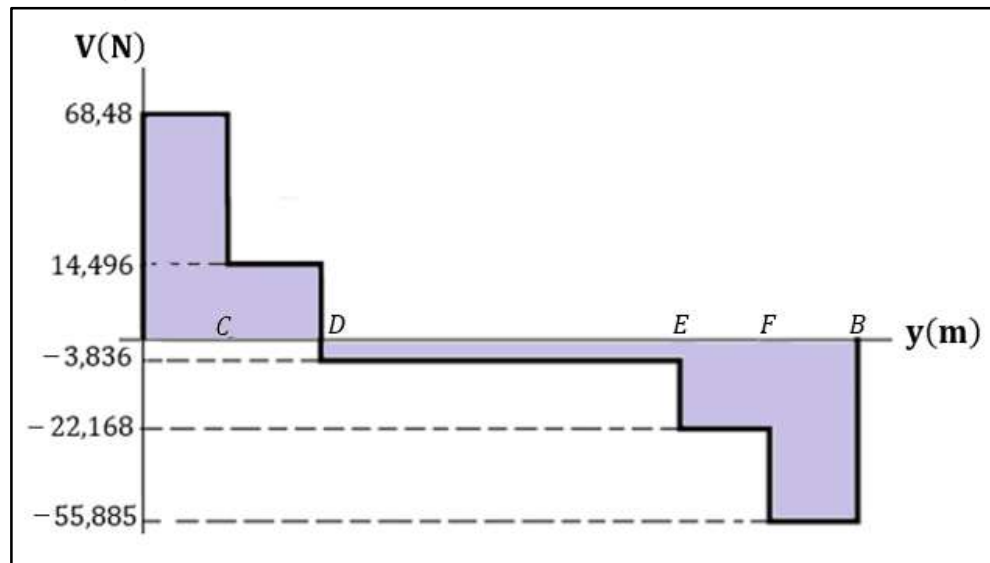
$$R_{BZ}(B) = F_{1p}(C) + F_2(D) + F_3(E) + F_4(F) \quad \text{Ec. 47}$$

$$R_{BZ} = 55,885 \text{ N}$$

$$R_{AZ} = 68,48 \text{ N}$$

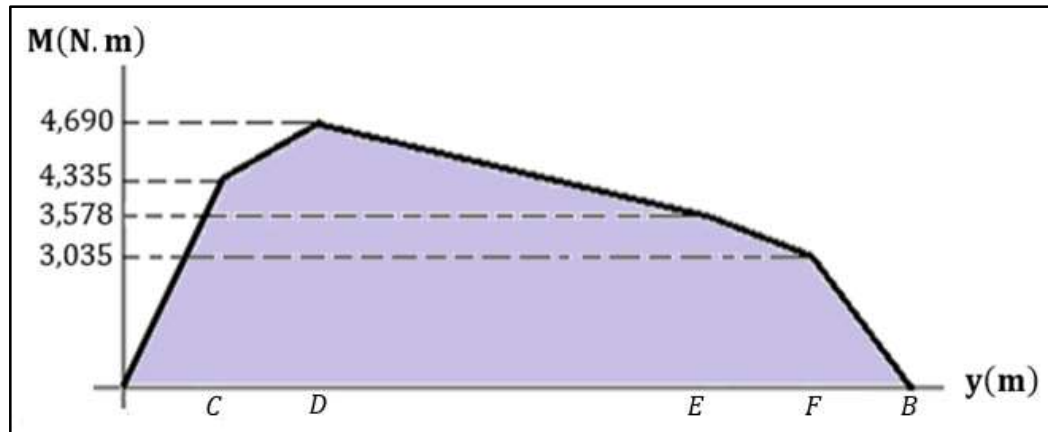
En la figura 42 y 43 se muestra el diagrama de cortante y el diagrama de momentos respectivamente.

Figura 42. Diagrama de cortante del primer análisis.



Fuente: Autor.

Figura 43. Diagrama de momento del primer análisis.



Fuente: Autor.

- Segundo análisis: Plano XY.

$$F_{px} = 3 \text{ N}$$

Ecuaciones de Equilibrio:

$$\sum F_x = 0 = R_{AX} - F_{px} + R_{BX} \quad \text{Ec. 48}$$

$$R_{AX} + R_{BX} = 3 \text{ N}$$

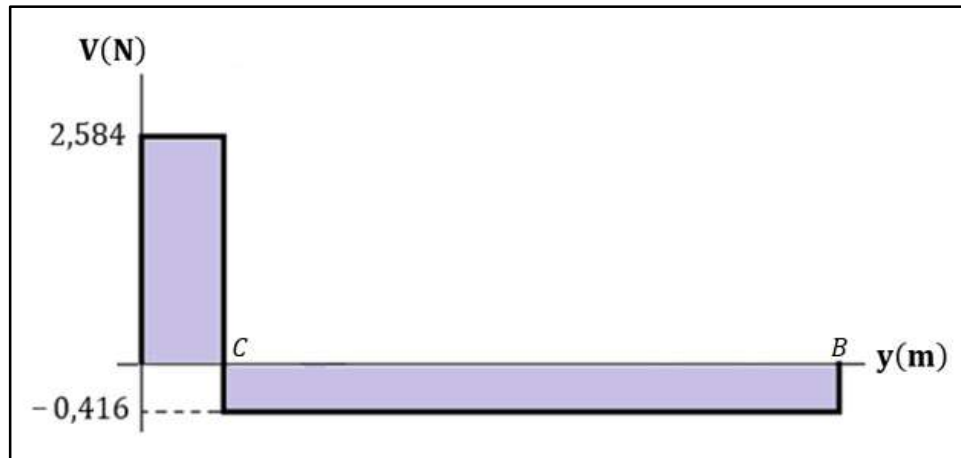
$$\sum M_A = 0 = -F_{px}Y_1 + R_{BX}L \quad \text{Ec. 49}$$

$$R_{BX} = 0,416 \text{ N}$$

$$R_{AX} = 2,584 \text{ N}$$

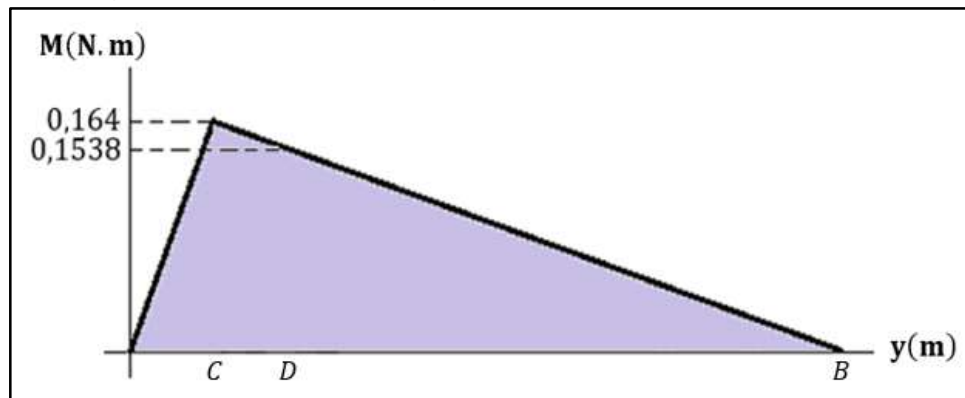
En la figura 44 y 45 se ilustran el diagrama de cortante y el diagrama de momento del segundo análisis respectivamente.

Figura 44. Diagrama de cortante segundo análisis.



Fuente: Autor.

Figura 45. Diagrama de momento segundo análisis.



Fuente: Autor.

Podemos ver que el punto crítico para el momento flexionante ocurre en el punto C o en el punto D. En C, el momento resultante es

$$M_C = \sqrt{(4,335)^2 + (0,164)^2}$$

$$M_C = 4,338 \text{ N.m}$$

En D, el momento resultante es

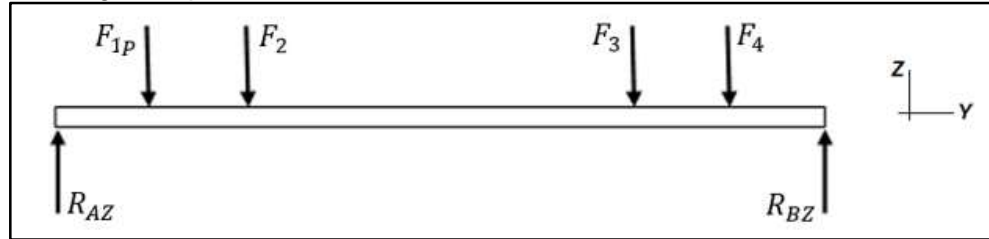
$$M_D = \sqrt{(4,690)^2 + (0,1538)^2}$$

$$M_D = 4,693 \text{ N.m} = M_{max}$$

Por lo que el momento flexionante máximo se encuentra en el punto D, el cual se utilizara más adelante para encontrar el esfuerzo máximo al que se someterá la viga en cuestión.

El análisis de deflexión se hace usando las ecuaciones de singularidad para encontrar la ecuación que describe la pendiente y así usar como restricción el desalineamiento permisible de los rodamientos que para el caso es de 0,001 rad. En la figura 46 se muestra el plano de la viga para el análisis de deflexión. Se procede de la siguiente manera:

Figura 46. Diagrama para análisis de deflexión.



Fuente: Autor.

Funciones de singularidad:

$$EI \frac{d^2 z}{dy^2} = R_{AZ} \langle y - 0 \rangle^1 - F_{1p} \langle y - C \rangle^1 - F_2 \langle y - D \rangle^1 - F_3 \langle y - E \rangle^1 - F_4 \langle y - F \rangle^1 \quad \text{Ec. 50}$$

$$EI \frac{dz}{dy} = R_{AZ} \frac{\langle y - 0 \rangle^2}{2} - F_{1p} \frac{\langle y - C \rangle^2}{2} - F_2 \frac{\langle y - D \rangle^2}{2} - F_3 \frac{\langle y - E \rangle^2}{2} - F_4 \frac{\langle y - F \rangle^2}{2} + C_1 \quad \text{Ec. 51}$$

$$EI z = R_{AZ} \frac{\langle y - 0 \rangle^3}{6} - F_{1p} \frac{\langle y - C \rangle^3}{6} - F_2 \frac{\langle y - D \rangle^3}{6} - F_3 \frac{\langle y - E \rangle^3}{6} - F_4 \frac{\langle y - F \rangle^3}{6} + C_1 y + C_2 \quad \text{Ec. 52}$$

$$\text{Si } y = 0, \quad z_A = 0 \rightarrow C_2 = 0$$

$$\text{Si } y = 0, \quad \theta_A = 0 \rightarrow C_1 = 0$$

$$\text{Si } y = y_1 \quad \theta = 0,001$$

$$EI(0,001) = R_{AZ} \frac{\langle y_1 - 0 \rangle^2}{2} - F_{1p} \frac{\langle y_1 - y_1 \rangle^2}{2} \quad \text{Ec. 53}$$

$$EI(0,001) = 0,1372 \quad \text{Ec. 54}$$

El módulo de elasticidad E del acero inoxidable es de 193 GPa.⁶⁶
Para un eje hueco circular, el momento de inercia I está dado por:

$$I = \frac{\pi}{4} (r_2^4 - r_1^4) \quad \text{Ec. 55}$$

Donde r_2 es el radio exterior y r_1 es el radio interior.

El radio interno se calcula asumiendo que se trata de una canalización metálica teniendo en cuenta que esta alojara los conductores que harán conexión en la fuente de poder.

Del catálogo de Procables presentado en el anexo B, se seleccionan 2 conductores de cobre aislados calibre 14 AWG, cuyo diámetro exterior es de 3,15 mm. Sabiendo que los conductores deben ocupar máximo el 40% del área total de alojamiento:

$$S_{int} \geq \frac{\sum S_i}{0,4} \quad \text{Ec. 56}$$

$$S_1 = S_2 = 7,7931 \text{ mm}^2$$

$$S_{int} \geq 38,9656 \text{ mm}^2$$

$$D_{int} \geq 7,0436 \text{ mm}$$

$$D_{int} = 8 \text{ mm} \quad r_{int} = r_1 = 4 \text{ mm} = 0,004 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta lo anterior:

$$I = \frac{\pi}{4} (r_2^4 - 2,56 * 10^{-10}) \quad \text{Ec. 57}$$

Retomando:

$$EI(0,001) = 0,1372$$

⁶⁶ ITALUMINIO. Ficha técnica del acero inoxidable 304. Pág., 2.

$$I = 7,11 * 10^{-10}$$

Ec. 58

Igualando las ecuaciones 57 y 58,

$$\frac{\pi}{4}(r_2^4 - 2,56 * 10^{-10}) = 7,11 * 10^{-10}$$

Resolviendo:

$$r_2^4 = 1,161 * 10^{-9}$$

$$r_2 = 0,00584 \text{ m} = 5,8 \text{ mm}$$

Conociendo el radio exterior mínimo, se calcula la deflexión máxima a la que estará sujeta la viga. La deflexión es máxima en el lugar donde la pendiente es cero, por lo que hay que encontrar el valor de y donde $\theta = 0$. De la ecuación 51

$$EI \frac{dz}{dy} = R_{AZ} \frac{\langle y - 0 \rangle^2}{2} - F_{1p} \frac{\langle y - C \rangle^2}{2} - F_2 \frac{\langle y - D \rangle^2}{2} - F_3 \frac{\langle y - E \rangle^2}{2} - F_4 \frac{\langle y - F \rangle^2}{2}$$

Y conociendo los valores de

$$F_{1p} = 53,984 \text{ N}$$

$$F_2 = 18,332 \text{ N} = F_3$$

$$F_4 = 33,717 \text{ N}$$

$$R_{AZ} = 68,48 \text{ N}$$

$$E = 193 \text{ GPa}$$

$$I = 7,125069 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

$$C = Y_1 = 0,0633 \text{ m}$$

$$D = Y_1 + Y_2 = 0,0878 \text{ m}$$

$$E = Y_1 + Y_2 + Y_3 = 0,3778 \text{ m}$$

$$F = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 = 0,4023 \text{ m}$$

$$B = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 = 0,4566 \text{ m}$$

Se obtiene

$$0 = 27,9425y^2 - 25,5169155y + 4,215571233$$

Ec. 59

Con lo que se consigue dos valores de y

$$y_1 = 0,69663 \text{ m}$$

$$y_2 = 0,21657 \text{ m}$$

Como y_1 sobrepasa la longitud completa de la viga, la pendiente es cero en y_2 . Entonces la deflexión máxima es

$$EIz = R_{AZ} \frac{\langle y - 0 \rangle^3}{6} - F_{1p} \frac{\langle y - C \rangle^3}{6} - F_2 \frac{\langle y - D \rangle^3}{6} - F_3 \frac{\langle y - E \rangle^3}{6} - F_4 \frac{\langle y - F \rangle^3}{6}$$

$$z_{\text{máx}} = 0,00056022 \text{ m} = 0,56022 \text{ mm}$$

Sabiendo el radio externo mínimo del eje, se determina el diámetro definitivo del modelo, teniendo en cuenta el diámetro interno de los rodamientos comerciales, además de los rebajes que el eje debe tener para asegurar axialmente los elementos haciendo uso de anillos de retención como se verá más adelante. En la figura 47 se presenta el modelo del eje.

Figura 47. Eje.



Fuente: Autor.

Ahora se determinara el esfuerzo máximo flexionante presente en el eje diseñado con el fin de establecer que este no sobrepase el 60% del esfuerzo de fluencia. En el caso del esfuerzo cortante es necesario tener en cuenta los aspectos diferenciales de la no linealidad del diagrama tensión-deformación, por lo que los fabricantes no ofrecen información al respecto para el acero inoxidable, además, de

que en general, en una viga sometida únicamente a cargas flexionantes, los esfuerzos cortantes son mucho menores que los esfuerzos flexionantes, por lo que para simplificar los cálculos, se suelen ignorar.

El esfuerzo de flexión es máximo en la fibra más externa de la viga y se obtiene con:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot c}{I} = \frac{M_{max}}{Z} \quad \text{Ec. 60}$$

Donde

$$M_{max} = 4,693 \text{ N.m}$$

$$Z = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} = 0,784 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{para una viga circular hueca,}$$

Así que,

$$\sigma_{max} = 5,99 \text{ MPa}$$

Para el acero inoxidable 304,

Resistencia máxima a la tensión = 515 MPa y Esfuerzo de fluencia al 0,2% = 205 MPa.⁶⁷

El esfuerzo flexionante máximo es considerablemente menor al esfuerzo de fluencia, y por lo tanto no sobrepasa el 60% del mismo, lo que nos asegura que el eje diseñado cumple con los requerimientos de resistencia y deflexión.

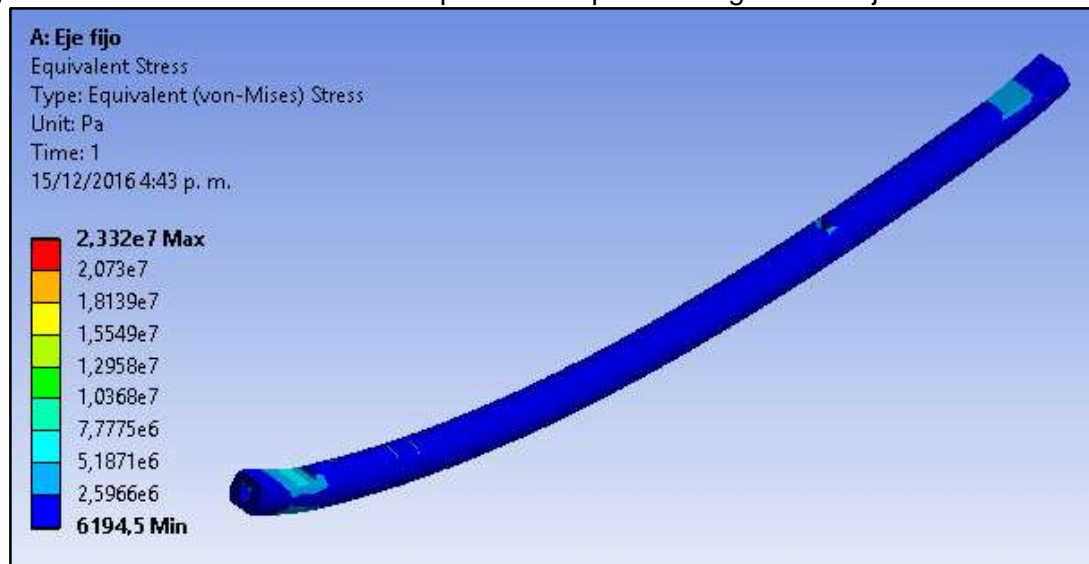
Adicionalmente se realizó un análisis estático al eje haciendo uso del módulo de ANSYS Statics Structural que permite simular el comportamiento de la viga cargada, de tal forma que se puede observar la distribución de esfuerzos y la deformación producida por las cargas analizadas.

Para la simulación, se ubicó en los extremos del eje una restricción articulada y se cargó con las fuerzas utilizadas en el análisis de deflexión.

La simulación se muestra en las figuras 48 y 49.

⁶⁷ ITALUMINIO. Op. cit., p. 2.

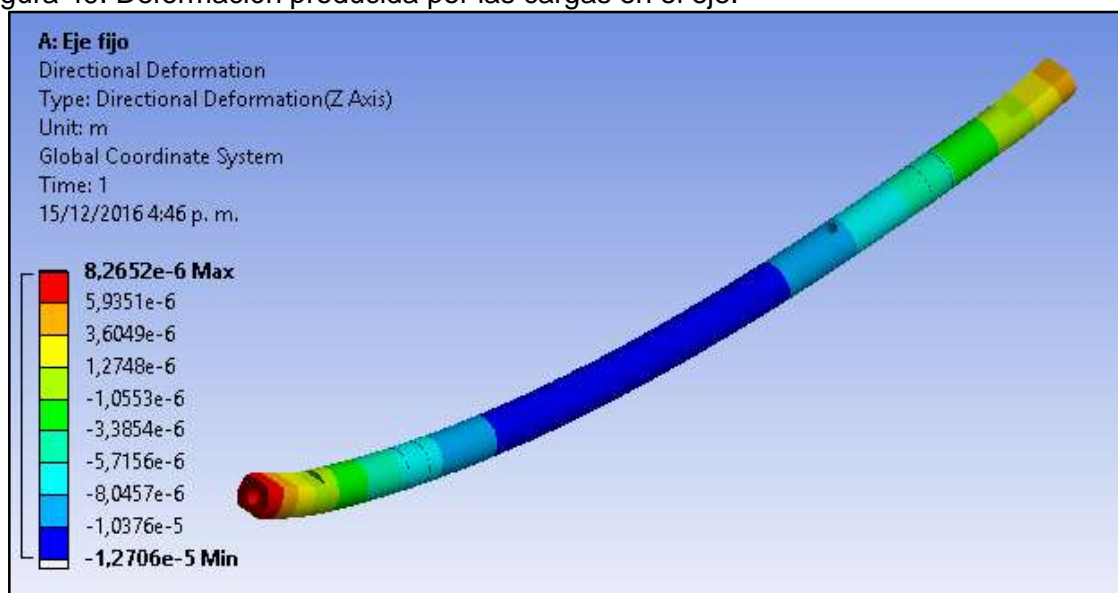
Figura 48. Distribución de esfuerzos producidos por las cargas en el eje.



Fuente: Autor.

En la figura 48 se puede observar que la concentración de esfuerzos es mayor en los extremos del eje, donde hay una reducción de área para mantener fijo el eje, aunque estos son pequeños y están bastante lejos del 60% del esfuerzo de fluencia al 0,2%.

Figura 49. Deformación producida por las cargas en el eje.



Fuente: Autor.

En la figura 49 se muestra la deformación causada por las cargas en el eje. La deflexión máxima ocurre cerca de la mitad del eje y tiene un valor de $0,000012706\text{ m} = 0,012706\text{ mm}$ que es considerablemente menor a la calculada anteriormente como deformación máxima ($0,00056022\text{ m} = 0,56022\text{ mm}$) que se produce por el desalineamiento máximo admitido por los rodamientos ($0,001\text{ rad}$).

Con las simulaciones se comprueba finalmente que el eje cumple los requerimientos de tamaño y resistencia.

3.3.6 Selección de Rodamientos y Anillos de retención. Para la selección de los rodamientos se tomó en cuenta el diámetro mínimo que debía tener el eje y el espacio disponible para su montaje, las cargas a las que se iba a someter, la desalineación, y las condiciones de funcionamiento de la máquina como la velocidad, lubricación, juego y vibraciones principalmente.

En principio, debido a que en el eje solo se presentan cargas radiales y el espacio de montaje axial es limitado, se decide trabajar con rodamientos de rodillos cilíndricos que soportan muy bien cargas únicamente radiales, además de que las dimensiones de su sección transversal, particularmente el ancho, suelen ser reducidas.

El rodamiento se selecciona teniendo en cuenta el diámetro interno del mismo que depende del diámetro del eje; en este caso el eje tiene un diámetro muy reducido por lo que se tomara el menor diámetro comercial de los rodamientos (20 mm), y se ajustara el diámetro del eje a ese valor. Con respecto a la desalineación, los rodamientos de rodillos cilíndricos soportan desalineaciones angulares muy pequeñas, $0,001\text{ rad}$.⁶⁸, por lo que el eje se diseñó con el fin de que la deflexión no sobrepase el límite del rodamiento.

Este rodamiento no requiere precarga debido a que la carga que debe soportar está muy por debajo de su capacidad, además de que la desalineación y la deformación elástica se controlan en el diseño del eje. También la velocidad de funcionamiento es baja en comparación con las velocidades de funcionamiento normales, por lo que no es un factor determinante en el momento de la selección del rodamiento.

⁶⁸ NTN. Rodamientos de bolas y de rodillos. Diseño del eje y del alojamiento. Pág., A-87

Un factor importante en la selección del rodamiento es la capacidad de carga dinámica, la cual se encuentra haciendo uso de la ecuación 60.

$$C_r = P_r \frac{f_h}{f_n} \quad \text{Ec. 61}$$

Donde P_r es la carga radial aplicada, f_h es el factor de vida y f_n es el factor de velocidad. Cabe mencionar que el factor de vida está asociado a la vida nominal básica L_{10h} y el factor de velocidad está asociado a la velocidad de rotación n (rpm).

Para encontrar f_h y f_n se utilizan las ecuaciones 61 y 62, mostradas a continuación.

$$f_h = f_n \frac{C}{P} \quad \text{Ec. 62}$$

$$f_n = \left(\frac{33,3}{n} \right)^{10/3} \quad \text{Ec. 63}$$

De esta forma, para $n = 100 \text{ rpm}$ tenemos $f_n = 0,72$.

En este caso, el valor de f_h no puede hallarse haciendo uso de la ecuación antes mencionada por depender de C , por lo que se utilizara la fig. 3.1 de la pág. A-17 del catálogo de rodamientos de NTN (presentada en el anexo B) que muestra una escala que relaciona la vida nominal básica L_{10h} y el factor de vida f_h , de manera que es necesario conocer uno de los dos.

Mediante el uso de la tabla 3.4 de la pág. A-19 del catálogo podemos obtener una vida nominal básica de referencia según el tipo de servicio, para el caso maquinas con utilización por periodos cortos de tiempo e intermitentemente, pero con requerimientos de alta confiabilidad, se usa una media de 12000 h.

De la fig. 3.1, y con $L_{10h} = 12000 \text{ h}$, tenemos $f_h = 2,6$.

Además, en este caso la carga radial aplicada producida por la polea sobre el rodamiento y el peso del tambor $F_{1P} = P_r$ es igual a 53,984 N. De la ecuación 60,

$$C_r = 194,94 \text{ N} = 0,195 \text{ kN}$$

Con esto se selecciona un rodamiento de rodillos cilíndricos con un diámetro interno de 20 mm (mínimo diámetro interno comercial) y una $C_r = 25,7 \text{ kN}$, que resulta bastante mayor a la carga dinámica radial mínima requerida, cumpliendo así con las exigencias dimensionales y de carga mínimas del eje.

Con el fin de evitar daños y malfuncionamiento, además de no acortar la vida del rodamiento es necesario elegir el ajuste adecuado, ya sea en el eje o en el alojamiento, por lo que se debe tener en cuenta, en principio, las condiciones de giro del rodamiento.

En este caso, el anillo interior es estacionario, el anillo exterior es rotativo y la carga tiene sentido constante, por esto se presenta una carga estacionaria en el anillo interior y una carga rotativa en el anillo exterior, lo que hace recomendable un ajuste holgado en el interior y un ajuste apretado en el exterior⁶⁹. En el eje como no se requiere desplazamiento axial del anillo interior se sugiere un ajuste h6, y en el alojamiento con una magnitud de carga liviana ($P_r \leq 0,06C_r$) se sugiere un ajuste M7⁷⁰.

Teniendo en cuenta que los rodamientos seleccionados son de clase normal (clase 0), refiriéndose con esto a los rodamientos de precisión estándar; a continuación se presenta las tolerancias y ajustes del rodamiento con el eje y el alojamiento⁷¹. Todas las tolerancias están dadas en μm .

Rodamiento de rodillos cilíndricos clase 0:

Anillo interior D20 $_{-10}^0$

Anillo exterior D34 $_{-11}^0$

Eje D20h6 $_{-13}^{+10}$

Alojamiento D34M7 $_{-11}^{+25}$

Debido a que las condiciones de operación son normales, velocidad de rotación y cargas pequeñas, se selecciona un juego radial interno normal que permite un juego efectivo adecuado. Para el caso el juego normal interno para rodamientos de rodillos cilíndricos es min. $20 \mu\text{m}$ y máx. $45 \mu\text{m}$.

⁶⁹ NTN. Op. cit., p. A-49.

⁷⁰ Ibid., pp. A-51, A-52.

⁷¹ Ibid., pp. A-54, A-55.

Para fijar el rodamiento axialmente se utiliza anillos de retención. Para su selección, se toma en cuenta la altura de los hombros en el asiento, que para este rodamiento es de 2,75 mm⁷², para determinar la altura del anillo, con lo que se decide utilizar un anillo para ejes tipo A DIN 471 para un eje de 20 mm de diámetro, que tiene una altura de anillo de 2,6 mm, lo cual resulta ser bastante aceptable. Estos anillos se ubican en las caras internas del rodamiento.

Además de esto, también se utilizan para fijar axialmente el electroimán al eje, ubicando los anillos en las caras externas del soporte del electroimán.

Para la lubricación del rodamiento es recomendable utilizar grasa preferiblemente en rodamientos sellados de fábrica, debido a que el anillo exterior es rotativo lo que impide la lubricación por aceite, además de hacerse necesario el uso de aditivos para trabajar a bajas velocidades. Al no tener demasiadas limitaciones de trabajo ya que, no se presentan elevadas temperaturas, las cargas son pequeñas y la velocidad es baja, además de que no hay agentes contaminantes pues el tambor esta sellado, es posible utilizar grasas de propósito general.

Los diagramas del rodamiento y el anillo de retención así como sus especificaciones técnicas se muestran en el anexo B.

3.3.7 Selección de Motor. El par necesaria para vencer la inercia y hacer girar el tambor es de 0,369 N.m, y dado que girara a 100 rpm (10,47 rad/s) la potencia del motor debe ser de 3,86 W (0,0052 HP) mínimo. Dado que la velocidad es muy baja, es necesario utilizar un reductor de velocidad que se acoplara al motor, o utilizar un motorreductor directamente.

Como la carga a accionar es uniforme y de pequeña masa, y además tendrá una frecuencia de maniobra baja, se tendrá un factor de servicio de 1.

Para este propósito se selecciona un motorreductor MOTOX Siemens de ejes coaxiales z.18-LA71B4 de 0,14 kW, una velocidad de salida n_2 de 155 rpm, un par de salida T_2 de 8,9 N.m y un factor de servicio f_s de 9,8. Que además de cumplir los requerimientos de potencia y velocidad, permite que la transmisión de fuerza a la maquina se haga a través de poleas, ruedas dentadas o catarinas debido a que el eje de salida es macizo; asimismo el eje del motor y el eje de salida están

⁷² NTN. Op. cit., p. A-86.

alineados lo que reduce el espacio de ocupación. La hoja de características de este motorreductor se presenta en el anexo B.

Debido a que la velocidad de salida del motorreductor es mayor que la escogida para la rotación del tambor, la polea motriz asociada al eje del motor tendrá un diámetro menor que la polea conducida.

3.3.8 Sistema de transmisión. Está compuesto por una polea motriz, una polea conducida y una banda en V que transmite el movimiento. Las bandas en v tienen diversas ventajas como una instalación fácil y económica, operación silenciosa, reducen el riesgo de ruptura al patinar cuando se presenta un bloqueo en la transmisión, además de no necesitar lubricación para su funcionamiento, lo que hace a este sistema de transmisión altamente recomendable⁷³.

Este tipo de bandas están diseñadas para aplicaciones de servicio liviano, de menos de 1 HP⁷⁴, por lo que es muy conveniente para esta aplicación en particular, además de que permiten que las poleas sean más pequeñas por su alta capacidad de potencia, lo que generara ahorros importantes de espacio y materiales.

La polea conducida y la polea motriz son poleas fabricadas en acero laminado 1020 debido a que trabajarán en ambientes con polución de partículas abrasivas ocasionadas por las actividades de separación de minerales.

Se presenta ahora el procedimiento de selección de la transmisión por bandas en V, que se basa en la siguiente información.

Motorreductor de eje coaxial de 0,19 HP (0,14 kW)
Revoluciones que entrega la maquina motriz n_1 : 155 rpm
Revoluciones requeridas en la maquina n_2 : 100 rpm
Diámetro del eje motor: 16 mm, cuñero: 5 x 28mm
Diámetro del eje del equipo D_2 : 20 mm
Distancia entre centros de los ejes C : 303,33 mm
Tipo de servicio: intermitente (menos de 12 horas diarias)

⁷³ INTERMEC. Poleas en v, transmisión de potencia. 2014. Pág., 2.

⁷⁴ Ibid., p. 3.

Se determina la potencia de diseño, usando un factor de servicio de 1,1 típico de transportadores de trabajo ligero en servicio intermitente⁷⁵.

$$\text{Potencia de Diseño} = \text{HP del motor} \times \text{FS} \quad \text{Ec. 64}$$

$$\text{Potencia de Diseño} = 0,19 \text{ HP} \times 1,1 = 0,21 \text{ HP}$$

Para elegir el tipo o perfil de la correa se tiene en cuenta la potencia de diseño (HP) y la velocidad del motor (rpm). Para una potencia de diseño de 0,21 HP y una velocidad del motor de 155 rpm es adecuado utilizar una correa o banda en V de alta capacidad 3V⁷⁶.

Se establece la relación de velocidad, así

$$\text{Relación de velocidad} = \frac{\text{RPM del motor}}{\text{RPM del equipo}} \quad \text{Ec. 65}$$

$$\text{Relación de velocidad} = \frac{155}{100} = 1,55$$

Ahora se selecciona el diámetro de la polea motriz mínimo, el número de canales necesario y su capacidad de transmisión asociada.

Es importante que la polea motriz no sea muy pequeña, ya que, esto reduce la vida útil de las bandas y de los rodamientos del motor; por esto, se han establecido los diámetros mínimos de poleas recomendados según la potencia y la velocidad del motor.

Para una potencia de 0,5 HP, la mínima listada, se recomienda un diámetro mínimo de 65 mm⁷⁷ para cualquier velocidad.

Para calcular el diámetro de la polea motriz se hace uso de la relación de velocidad y el diámetro de la polea conducida, relacionadas en la ecuación 66. Sabiendo que el diámetro de la polea conducida es de 200 mm y la relación de velocidad 1,55; tenemos

⁷⁵ Ibid., p. 25.

⁷⁶ INTERMEC. Op. cit., p. 26.

⁷⁷ Ibid., p. 10.

$$\frac{D_2}{D_1} = \text{Relación de velocidad}$$

Ec. 66

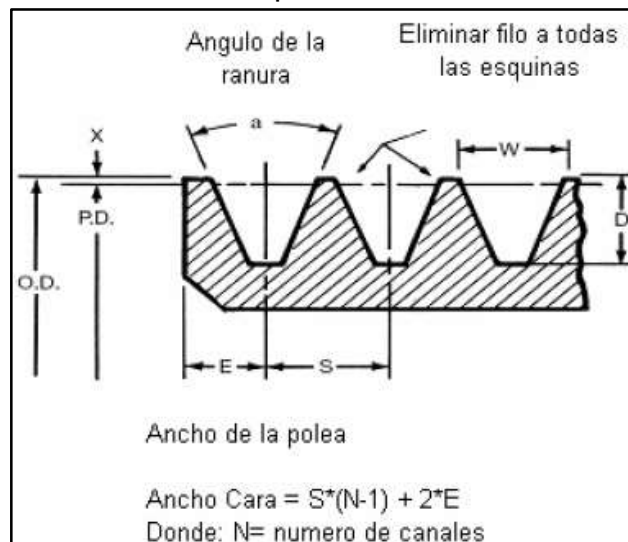
$$D_1 = \frac{200 \text{ mm}}{1,55} = 129,03 \text{ mm}$$

El valor comercial más cercano al calculado es de 130 mm.

La capacidad de transmisión de potencia de la polea depende del tipo de banda, el diámetro y la velocidad de rotación. Para bandas 3V, una polea de 130 mm de diámetro a 155 rpm puede transmitir 0,667 HP⁷⁸ por canal; la cual es mayor que la necesaria para hacer girar el tambor (0,0052 HP); por ende se selecciona como polea motriz una polea 3V de un solo canal de referencia PQ 1-3V130⁷⁹ con un buje QD= SH al cual le cabe un eje de máximo 34,9 mm con cuñero estándar.

Teniendo en cuenta lo anterior, la polea conducida es una polea de un canal para perfil 3V de diámetro 200 mm, que se mecanizara de tal forma que se acople al tambor por medio de tornillos permitiendo así el movimiento del mismo. Para su diseño se usan los parámetros mostrados en la figura 50 tomados del catálogo Ducasse, lo que permite que pueda trabajar con una comercial de iguales características sin presentar problemas al ensamblar la banda en V.

Figura 50. Parámetro de diseño de la polea.



Fuente: Catalogo general de poleas Ducasse, pag. 8.

⁷⁸ INTERMEC. Op. cit., p. 29.

⁷⁹ Ibid., p. 58.

Para la polea conducida de perfil 3V, un solo canal y diámetro exterior de 200 mm, los parámetros seleccionados son los siguientes.

Con D exterior min recomendado = 2,65 in = 67,31 mm y si D exterior efectivo se encuentra entre 6,01 y 12 in (152,65 y 304,8 mm)⁸⁰, entonces

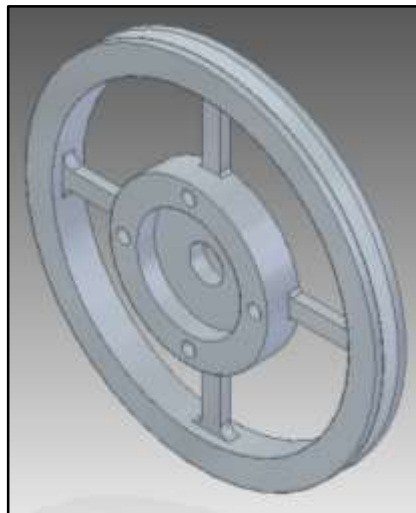
Tabla 12. Parámetros seleccionados a partir del diámetro exterior de la polea.

a	W [in (mm)]	D [in (mm)]	X [in (mm)]	E [in (mm)]
38°	0,350 (8,89)	0,350 (8,89)	0,025 (0,635)	0,344 (8,738)

Fuente: Catalogo General de poleas Ducasse, pag. 8.

En la figura 51 se muestra el modelo CAD de la polea.

Figura 51. Polea.



Fuente: Autor.

Se calcula el límite máximo de velocidad en rpm para poleas estándar para determinar si requiere balanceo dinámico. Donde D es el diámetro de la polea más grande y F el ancho de la polea en milímetros, que para una polea 3V de un solo canal es de 17,5 mm.

⁸⁰ DUCASSE COMERCIAL. Catálogo general de poleas en V. Perfil Americano. Poleas de perfil Estrecho 3V, 5V, 8V. Pág., 8.

$$RPM_{m\acute{a}x} = \frac{394000}{\sqrt{(D \times F)}} \quad \text{Ec. 67}$$

$$RPM_{m\acute{a}x} = 6659,82$$

La distancia entre centros es un factor importante ya que afecta la capacidad de transmisión, por lo que es recomendable mantener esta distancia entre 0,7 y 2 veces la suma de los diámetros con el fin de que el área de contacto, entre la polea de menor tamaño y la banda, no disminuya al estar las poleas demasiado cerca y manteniendo el arco de contacto de la banda sobre la polea pequeña entre 120° y 180°⁸¹.

$$0,7(D_1 + D_2) < C < 2(D_1 + D_2) \quad \text{Ec. 68}$$

$$231 < C < 660$$

$$\theta_1 = 180^\circ - 2\sin^{-1} \left[\frac{D_2 - D_1}{2C} \right] \quad \text{Ec. 69}$$

$$\theta_1 = 166,75^\circ$$

La distancia entre centros y el arco de contacto se mantienen dentro de los límites por lo que no es necesario aplicar un factor de corrección que considere la disminución de la capacidad de transmisión.

Por último, la longitud de la banda está dada por

$$L = 2C + 1,57(D_2 + D_1) + \frac{(D_2 + D_1)^2}{4C} \quad \text{Ec. 70}$$

$$L = 1214,51 \text{ mm} = 47,82 \text{ in}$$

La longitud estándar comercial más cercana es de 47,5 in, así que se selecciona una banda 3V475 de 3/8 pulg. de ancho, 5/16 pulg. de grosor y 47,5 pulg. de circunferencia exterior.

⁸¹ INTERMEC. Op. cit., p. 24.

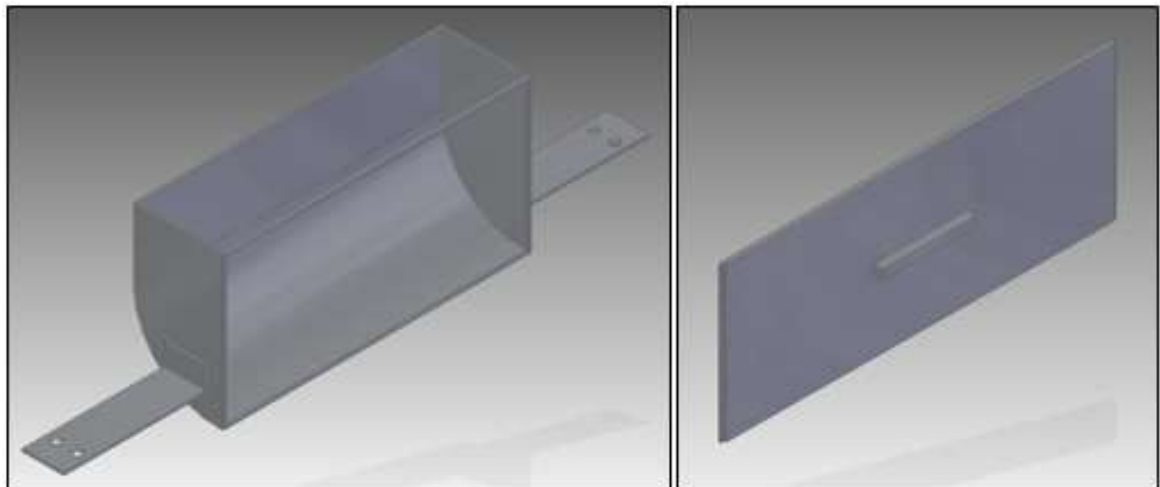
La banda está compuesta por un núcleo de alta resistencia de una mezcla de cauchos especiales, unas fibras sintéticas de poliéster o fibra de vidrio como elementos tensores y un recubrimiento de tela mixta de algodón que protege el interior de la banda.

Todas las referencias utilizadas para los cálculos de la transmisión se muestran en el anexo B.

3.3.9 Alimentador. Es el elemento de entrada de la suspensión, y la conduce hacia el canal. Como la suspensión debe ser agitada antes de ingresar al canal con el fin de que las partículas estén en contacto con el tambor magnético y sea más probable su recuperación, el alimentador se diseñó con una puerta corrediza que cierra el paso de la suspensión, permitiendo que sea agitada, y que se abre subiéndola manualmente una vez se encuentra lista la suspensión para iniciar el proceso.

Puede fabricarse de acero estructural, teniendo la precaución de aplicar pintura anticorrosiva con el fin de protegerlo del medio en contacto. En la figura 52 se muestra el modelo CAD del alimentador.

Figura 52. Alimentador y tapa corrediza.

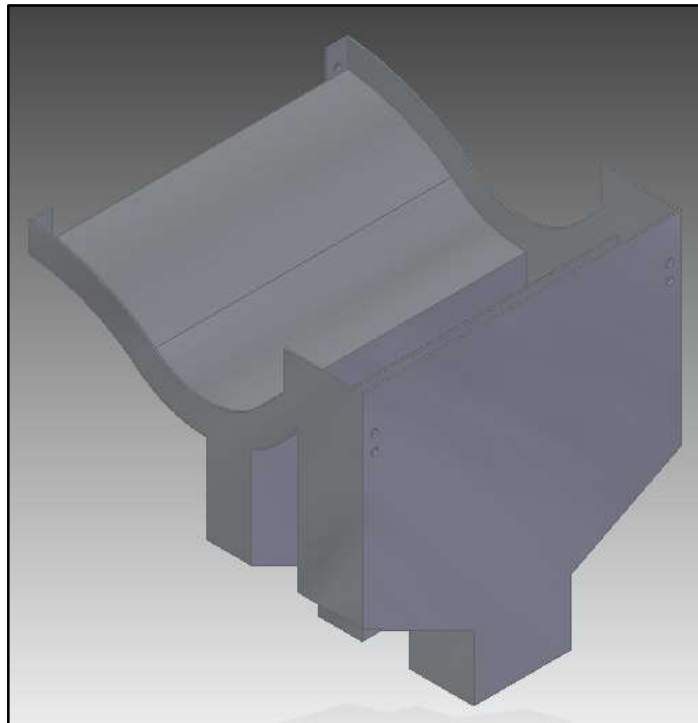


Fuente: Autor.

3.3.10 Canal. El canal se diseñó de forma que pueda estar lo más cerca posible del tambor para maximizar la recuperación de partículas. Como se vio en la figura 30 la distancia entre el tambor y el canal de circulación es de 1 cm, donde las partículas, aun estando en el fondo del canal, puedan ser recuperadas.

La forma del canal facilita la circulación de la suspensión y finalmente separa las partículas en dos depósitos. De igual forma que el alimentador, el canal puede fabricarse de acero estructural y como está en constante contacto con la suspensión es necesario recubrirlo con pintura anticorrosiva. En la figura 53 se presenta el modelo CAD del canal.

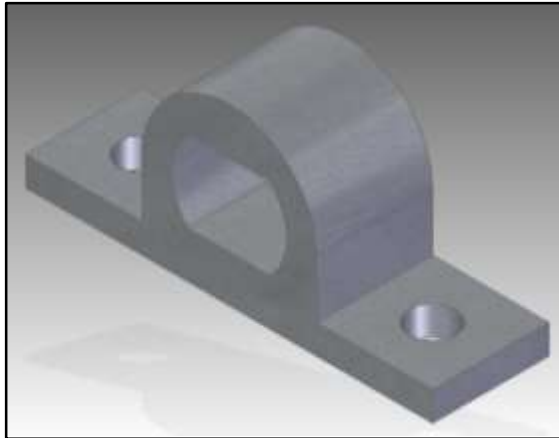
Figura 53. Canal.



Fuente: Autor.

3.3.11 Elementos de sujeción. Estos sostienen el eje y lo mantiene fijo con el fin de impedir su rotación. También pueden fabricarse de acero estructural. El modelo CAD de estos elementos se muestra en la figura 54.

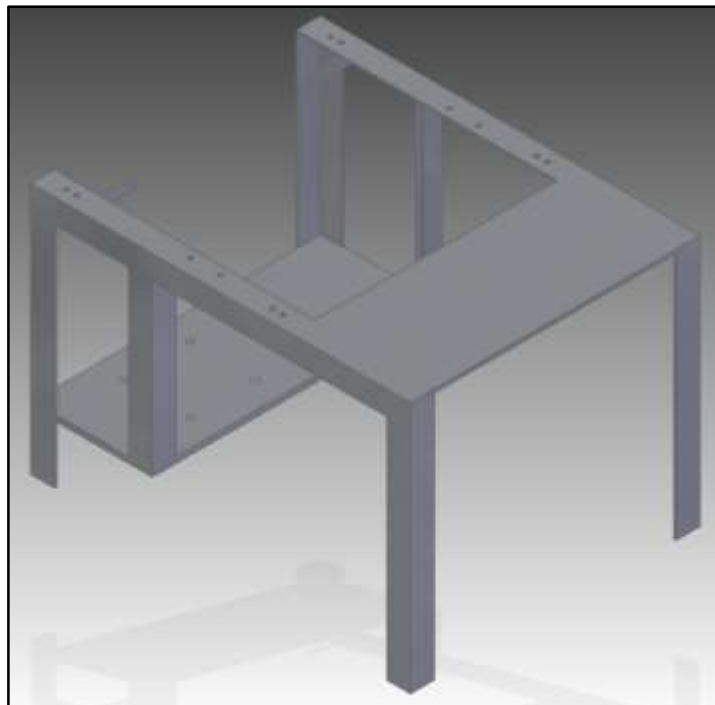
Figura 54. Elemento de sujeción.



Fuente: Autor.

3.3.12 Soporte. Compuesto por perfiles estructurales en L 3x40, soldados entre sí, formando un conjunto que soporta todo el equipo de separación, además de 2 láminas para soportar el motor y la fuente de alimentación. El modelo CAD del soporte se presenta en la figura 55.

Figura 55. Soporte.



Fuente: Autor.

3.3.13 Tornillos y tuercas. Para las uniones entre las diferentes piezas del equipo se escogió hacer uso de tornillos y tuercas, con el fin de poder desmontar y remontar las piezas para recambio o limpieza, según fuese necesario, con mayor facilidad. Los tornillos y tuercas utilizados se dividen en tres según la longitud del tornillo utilizado en la unión, y se dividen en dos de acuerdo al material del metal base, de las condiciones ambientales y de trabajo a las que están sometidas.

Es así, que se hace uso de tornillos hexagonales de rosca completa DIN 933 de acero M8x12 para unir el canal al soporte del equipo; M8x16 para unir el elemento que sujeta al eje, el alimentador y el raspador, todos al soporte; tornillos hexagonales de rosca completa DIN 933 de acero inoxidable AISI 304 M8x16 para ensamblar las tapas al tambor, M8x30 para acoplar la polea conducida a la tapa delantera. De igual forma, se utiliza tuercas hexagonales DIN 934 de acero y acero inoxidable según corresponda para cada tipo de tornillo.

Las uniones deben ubicarse en zonas lejanas a posibles fuentes de humedad para evitar problemas de corrosión. Los tornillos y tuercas de acero inoxidable se ubican en las uniones del mismo material como el tambor y las tapas debido a que el acero inoxidable AISI 304 no es magnético y no se ve afectado por el sistema magnético en el interior del tambor, además de que al estar demasiado cerca de la suspensión se debe evitar utilizar tornillos de acero al carbono con elementos estructurales de acero inoxidable ya que la relación de área del acero inoxidable con relación al acero al carbono es grande y los tornillos están sujetos a un ataque corrosivo⁸²; por esto es recomendable que la resistencia a la corrosión de los tornillos y del metal base sean similares.

Las hojas de características de tornillos y tuercas se presentan en el anexo B.

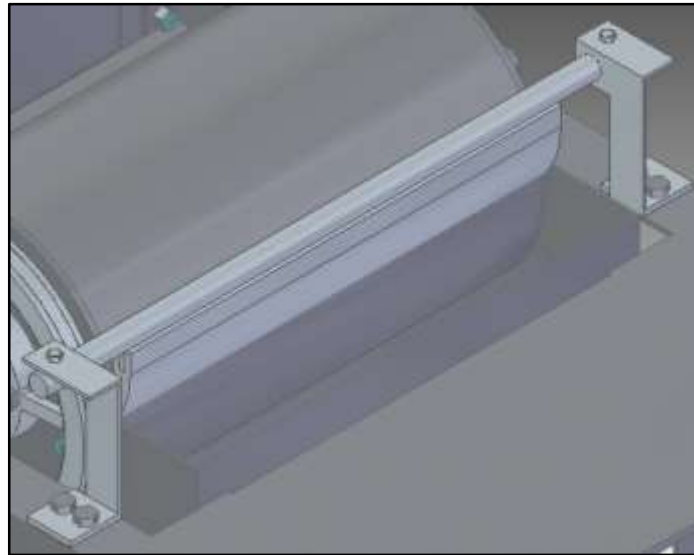
3.3.14 Raspador. Está compuesto por una hoja de poliuretano montada sobre un tubo de acero que la mantiene siempre en contacto con el tambor con el fin de retirar las partículas magnéticas que permanecen adheridas al tambor. El tubo de acero impide que la hoja se separe del tambor al mantener bloqueada su rotación, con tornillos que fijan el tubo al soporte. Esto se muestra en la figura 56.

La hoja de poliuretano tiene buena estabilidad y flexibilidad, alta resistencia a la abrasión, resistencia química, es muy ligero, tiene buena resistencia a la corrosión

⁸² EURO INOX, STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE. Op. cit., p. 28-29.

y alto rango de dureza, por lo que puede trabajar muy bien en medios húmedos. El raspador está montado de forma que pueda limpiarse fácilmente retirando los tornillos y girando el tubo de acero, evitando así el tener que desmontar la estructura completa para retirar la hoja.

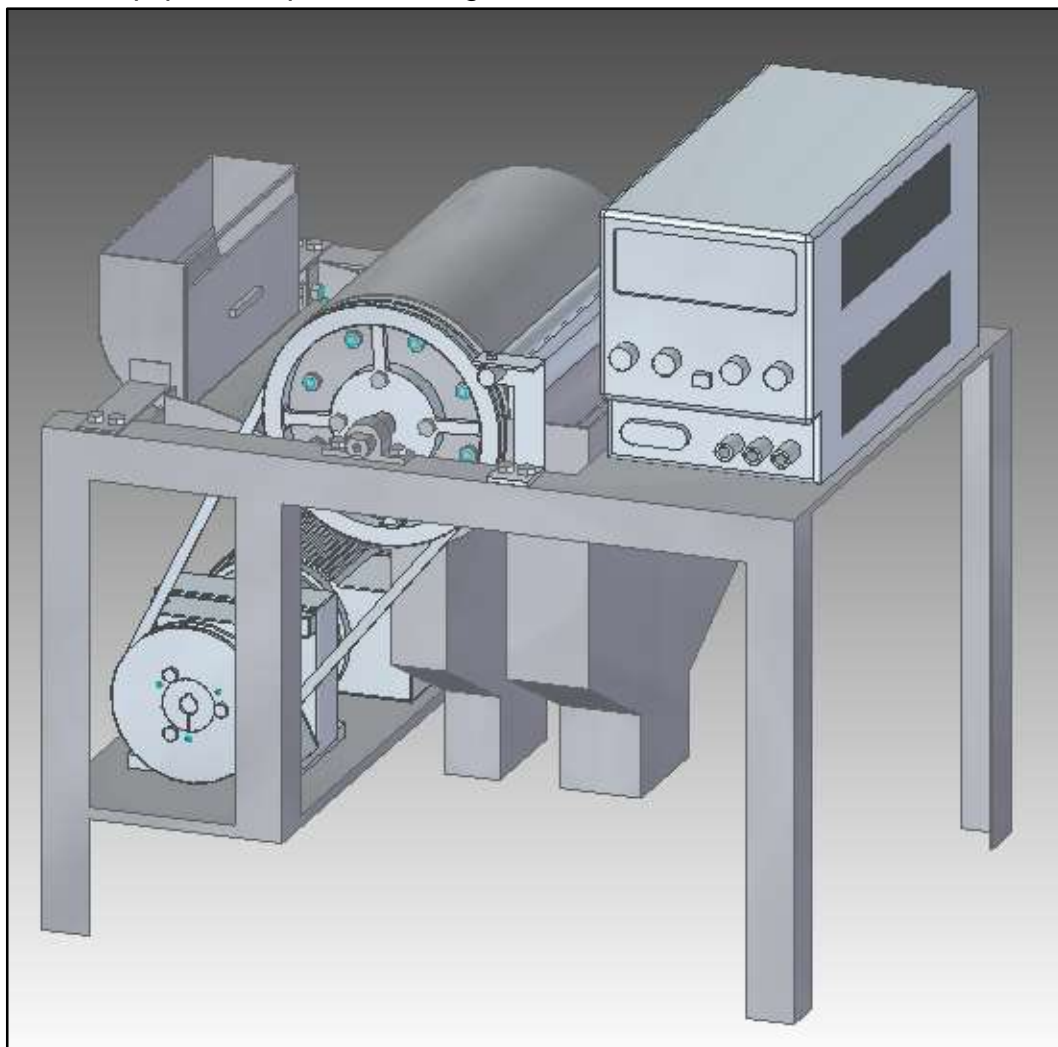
Figura 56. Raspador.



Fuente: Autor.

3.3.15 Conjunto. Todos los elementos antes mencionados, conforman el equipo de separación que se muestra en la figura 57.

Figura 57. Equipo de separación magnética.



Fuente: Autor.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El electroimán diseñado, producto de la simulación, generará una inducción magnética de 2,2 T en la superficie aproximadamente, pero al alejarnos de esta, la inducción disminuirá drásticamente hasta alcanzar 1,5 T en la superficie del canal, y teniendo en cuenta que el mineral de hierro más débilmente magnético presente en el departamento de Boyacá es la goethita y según la tabla 6 la inducción magnética necesaria para concentrar minerales débilmente magnéticos es de 1,8 T como máximo; en apariencia el separador no será capaz de separar el mineral de hierro, pero es importante tener en cuenta que en ningún proceso de separación, esta es completa y es necesario procesar varias veces la suspensión. Además, de que esta debe ser previamente agitada antes de entrar al alimentador con el fin de evitar que las partículas se asienten y la separación sea pobre.

El material utilizado para hacer los ensayos de fluidez fue la magnetita y la limonita, con el fin de observar cómo se comporta una suspensión de mineral magnético y de servir como base para dimensionar algunos componentes del equipo, pero cabe mencionar que si varía el mineral, variara el porcentaje de sólidos en la suspensión, por lo que es necesario hacer una caracterización fisicoquímica y mineralógica del mineral a separar previamente, para determinar la cantidad de agua necesaria en la suspensión, y la separación no se vea afectada por trabajar con una suspensión muy diluida o muy concentrada.

Las partículas del mineral a separar deben tener un tamaño muy pequeño, pues entre más pequeño mejor se mezcla con el agua formando una suspensión homogénea al agitarse, pero es importante tener en cuenta que si el mineral es demasiado fino, dificultara su recuperación y aumentan las pérdidas de material valioso, por lo que se recomienda que se trabaje con un tamaño de partícula de 75 μm .

El material elegido para el tambor es acero inoxidable AISI 304 por ser un acero inoxidable austenítico que no es magnético y tiene resistencia aceptable a la corrosión, ya que el tambor estará expuesto a una suspensión de mineral de hierro y agua, y al ambiente, que pueden causar corrosión. El material de aporte de la soldadura debe ser muy similar, si no igual, al material base para evitar cambiar la composición del mismo, haciéndolo magnético al aumentar el contenido de ferrita.

El dimensionamiento del eje se limita por el desalineamiento máximo admisible por el rodamiento, que en este caso es más crítico que los esfuerzos producidos en el eje ya que las cargas son pequeñas.

El diámetro externo producto del análisis de deflexión es el mínimo valor que debe tener el eje para mantener al límite el desalineamiento, por lo que es necesario elegir un diámetro mayor para evitar que se pueda sobrepasar el desalineamiento angular y producir mal funcionamiento o daños al rodamiento. Así mismo los esfuerzos producidos por las cargas sobre el eje con el diámetro externo calculado están dentro de los límites soportados por el material, que al ser acero inoxidable deben mantenerse menores al 60% de la resistencia de prueba del 0,2%; por lo que aumentar el diámetro dará aún más resistencia al eje.

Los rodamientos están sometidos a cargas radiales, en servicio intermitente, por lo que selecciona un rodamiento de rodillos cilíndricos. El anillo interior es estacionario, el exterior es rotativo, y la carga es constante y liviana, haciendo recomendable un ajuste holgado en el interior y un ajuste apretado en el exterior. Los rodamientos deben usar grasa como lubricante pues el anillo giratorio es el exterior y es preferible trabajar con rodamientos sellados de fábrica por la necesidad de mantener sellado el tambor. Además al trabajar a bajas velocidades es necesario añadir aditivos para este propósito.

Para el sistema de transmisión se selecciona un motorreductor por la necesidad de trabajar con una velocidad muy baja (100 rpm) a pesar de que el par necesario para vencer la inercia y hacer girar el tambor es muy reducido en comparación al que ofrece el motorreductor. Además de que permite que la transmisión se haga por medio de poleas al tener un eje de salida macizo. Es necesario mantener los ejes alineados para evitar pérdidas en la transmisión y daños en los elementos rodantes del motor y otras piezas asociadas al sistema.

Adicionalmente al motorreductor, se elige trabajar con un par de poleas en V por su fácil y económica instalación, de alta duración y se utilizan en aplicaciones con bajas transmisiones y servicio liviano. El perfil de la polea y la banda será 3V pues son compactas, permiten que las distancias entre centros sean cortas y la utilización de poleas pequeñas, además de tener mayor disponibilidad que los otros tipos de bandas en V.

La polea conducida se fabricara en acero laminado 1020, con refuerzos radiales para aligerarla y dar espacio a los tornillos de la tapa, y estará acoplada a la tapa del tambor con tornillos de acero inoxidable, por estar en contacto con la tapa del mismo material y en cercanía al sistema magnético.

La polea motriz se montara sobre un buje QD por su facilidad de montaje y desmontaje, que evita lastimar la polea, así mismo no se aflojan evitando el desgaste del eje.

El alimentador y el canal se fabrican en acero cuidando de recubrirlas con pintura anticorrosiva, ya que están en contacto directo con la suspensión que a la larga puede corroer el metal de estas piezas, contaminando el material a separar.

Las uniones entre piezas se harán con tornillos y tuercas, por permitir un fácil montaje y desmontaje según sea necesario. Es importante prestar atención al material base especialmente en aquellas uniones expuestas a ambientes corrosivos como las del tambor, ya que los tornillos y tuercas deben ser de materiales muy similares al material base con el fin de evitar ataques corrosivos en el tornillo, pues esta ataca al material menos noble. Se recomienda utilizar arandelas bajo las tuercas con el fin de asegurar las uniones.

El equipo aquí diseñado es de un tamaño mucho menor que el de los equipos industriales debido a que es un equipo de laboratorio y las exigencias de volumen de procesamiento y el tiempo de funcionamiento son mucho menores, además que el propósito de éste es académico, lo cual es ventajoso en términos de espacio pues no ocupa demasiado.

5. CONCLUSIONES

- La información referente a la identificación y caracterización del mineral de hierro de la región de Boyacá es muy limitada e incompleta, por lo que resulta una limitante importante a la hora de realizar trabajos que partan de este tipo de información. Es importante incentivar este tipo de estudios debido a que las características fisicoquímicas y mineralógicas del mineral varían con las condiciones del lugar donde se extrae, causando que los resultados varíen de igual forma.
- Las variables que intervienen el proceso de separación magnética dependen del mineral con el que se trabaje, por lo que, al ser este el diseño de un equipo de laboratorio, el mineral a separar estará variando continuamente, y con él las variables del proceso.
- Construir el modelo CAD del equipo de separación ayuda en gran medida al diseño del mismo, pues nos da la posibilidad de visualizar cada elemento, su tamaño y la forma en que se asocia con cada una de las demás partes, haciendo que sea muy fácil realizar cualquier modificación, lo que se verá reflejado en la construcción del aparato, pues disminuye las pérdidas por elementos rechazados y defectuosos.
- Este diseño puede utilizarse para su posterior construcción por lo que aporta al desarrollo académico de los estudiantes al entrar en contacto con conceptos prácticos y no solo teóricos, lo que fortalecerá el aprendizaje, además de mejorar los servicios prestados por el INCITEMA, aumentando la productividad del sector siderúrgico y minero.
- Este tipo de diseños son relevantes no solo porque permiten la construcción de los equipos diseñados, sino porque también pueden ser utilizados como un punto de referencia para futuros estudios relacionados con este tema y/o similares.

BIBLIOGRAFIA

Acero inoxidable SAE 304 [en línea]. [Citado 20 oct., 2015]. Disponible en internet: <<http://www.ferrocortes.com.co/?cat=52>>

ALVAREZ, Lili Yohana y ROJAS, Miler Alfonso. Estudio de concentración de minerales de hierro por métodos físicos para el proceso de sinterización en Acerías Paz del Río S.A. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2009.

ALVAREZ, Manuel. Nociones básicas de electromagnetismo. En: Electroimanes. España: Ed. Club Universitario. 2012. p. 82. ISBN 978-84-9948-989-6.

BARTNIK, J.; ZABEL, W.; HOPSTOCK, D. On the production of iron ore superconcentrates by high-intensity wet magnetic separation [en línea]. International Journal of Mineral Processing, v 2, p 117-126, Jun 1975. ISSN: 03017516.

Bobinas frente a la cc [en línea]. [Citado 18 jun., 2015]. Disponible en internet: <http://www.geocities.ws/pnavar2/continua/bobin_dc.html>

Catálogo de productos OTIA [en línea]. Disponible en internet: <<http://www.otia.com.ar/otia/CATALOGO%2006-2005.pdf>>

Catálogo DISLAS Universal en Tornillería y Herramientas [en línea]. Disponible en internet: <<http://www.tornilleriadislas.com/files/tornilleriadin.pdf>>

Catálogo General de poleas en V. DUCASSE Comercial [en línea]. Disponible en internet: <<http://www.ducasse.cl/catalogos/correas-y-poleas>>

Catálogo Motorreductores Motox SIEMENS. [en línea]. Disponible en internet: <http://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/drive_tech/Documents/Catalogo%20Motorreductores.pdf>

Catálogo NTN General [en línea]. Disponible en internet: <http://www.balisacr.com/catalogos/01_CATALOGO_NTN_GENERAL.pdf>

Catálogo Procables [en línea]. Disponible en internet: <http://www.procables.com.co/downloads/procables_catalogoproductos_2014_web.pdf>

CHAO, Lia; et. al. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting [en línea]. En: Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: part 1. China. 11 Septiembre 2009.

Coercitividad [en línea]. [Citado 14 jun., 2015]. Disponible en internet: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Coercitividad>>

Correas y poleas [en línea]. [Citado 04 mayo, 2015]. Disponible en internet: <<http://www.ducasse.cl/productos/correas-y-poleas>>

Cromita [en línea]. [Citado 14 jun., 2015]. Disponible en internet: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Cromita>>

DANA; HURLBUT, Cornelius. Mineralogía descriptiva. En: Manual de mineralogía. AMOROS, Jose. Barcelona: Ed. Reverté, S.A. 1960. p. 313

Electrodos para soldar Aceros Inoxidables (AWS A5.4). West Arco [en línea]. Disponible en internet: < <http://www.westarco.com/westarco/sp/productos/consumibles/electrodos/upload/3-Electrodos-para-soldar-Aceros-Inoxidables.pdf>>

Especial Industria Siderúrgica en Colombia. En Colombia, la producción es mucho menor que la demanda. Portafolio. Disponible en Internet:<<http://www.portafolio.co/negocios/especial-industria-siderurgica-colombia-0>>

EURO INOX, STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE. Materiales: propiedades, selección y durabilidad. En: Manual de diseño para acero inoxidable estructural. 2006. p. 16-17, 28-29.

FORERO, Alvaro; DIAZ, Sandra. Beneficio de una magnetita para producción de pelets utilizados en procesos de reducción directa [en línea]. Scientia et Technica Año XIII, Septiembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.

Formación de hierro bandeado [en línea]. [Citado 20 mayo, 2015]. Disponible en internet: < https://es.wikipedia.org/wiki/Formaci%C3%B3n_de_hierro_bandeado>

FRANKO, J.; KLIMA, M. Application of ultrasonics to enhance wet-drum magnetic separator performance [en línea]. Minerals and Metallurgical Processing, v 19, Febrero 2002. ISSN: 07479182.

Goethita [en línea]. [Citado 14 jun., 2015]. Disponible en internet: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Goethita>>

Hematita [en línea]. [Citado 14 jun., 2015]. Disponible en internet: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Hematita>>

Hierro [en línea]. [Citado 20 mayo, 2015]. Disponible en internet: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Hierro>>

Hierro [en línea]. [Citado 20 mayo, 2015]. Disponible en internet: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pertab/fe.html>>

ITALUMINIO. Ficha técnica del acero inoxidable 304 [en línea]. [Citado 20 mayo 2016]. Disponible en internet: <<http://italuminio.com.co/catalogos/SS304-ficha.pdf>>

JINXIN, Liu; et. al. Intelligent control for operation of iron ore magnetic separating process. En: World Congress on Intelligent Control and Automation (7: June 25 - 27, 2008, Chongqing, China).

Maghemita [en línea]. [Citado 14 jun., 2015]. Disponible en internet: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Maghemita>>

Magnetismo: definiciones [en línea]. [Citado 14 jun., 2015]. Disponible en internet: <http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/magnetismo_definiciones.htm#susceptividadmagnetica>

Mena (minería) [en línea]. [Citado 14 jun., 2015]. Disponible en internet: <[http://www.ecured.cu/index.php/Mena_\(Miner%C3%ADa\)](http://www.ecured.cu/index.php/Mena_(Miner%C3%ADa))>

Mena (minería) [en línea]. [Citado 14 jun., 2015]. Disponible en internet: <[https://es.wikipedia.org/wiki/Mena_\(miner%C3%ADa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Mena_(miner%C3%ADa))>

MIMEUR, Robert. Electromecánica de precisión. Barcelona: Ed. Reverté S.A. 1955.

Minerales [en línea]. [Citado 20 mayo, 2105]. Disponible en internet: <<http://www.areaciencias.com/TUTORIALES/LOS%20MINERALES.htm>>

Minería en el Departamento de Boyacá (Reseña general, municipios productores de minerales, distritos mineros, etc.) [en línea]. [Citado 15 mayo, 2015]. Disponible en internet: < <http://www.simco.gov.co/portals/0/delegadas/gobboyaca.pdf> >

MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. Mexico: Pearson Education, 2006. 266 p. ISBN 970-26-0812-0.

Movimiento circular. Profesor en línea. [en línea]. [Citado 20 diciembre, 2105]. Disponible en internet: <http://www.profesorenlinea.cl/fisica/MovimientoCircular.html>

NORRGRAN, Daniel. Wet Drum magnetic separators for heavy Media Application, Operation, and Performance. En: International Coal Preparation Congress 2010 Conference Proceedings, Pennsylvania, United States. Rick Q. Honaker. 2010.

OBERTEUFFER, John. Magnetic Separation: A review of principles, devices, and applications. En: Transactions on magnetics, Vol. Mag-10, No. 2, 1974.

PAVEZ, Osvaldo. Apuntes de concentracion de minerales 2. Departamento de Metalurgia, Facultad de Ingenieria, Universidad de Atacama. 2013.

Poleas en V [en línea]. [Citado 03 mayo, 2015]. Disponible en internet: <http://www.intermec.com.co/pdf/Las_poleas_en_v.pdf>

REAL SALADRIGAS, Esther. Capítulo 9: Conclusiones. En: Aportaciones al estudio del comportamiento a flexión de estructuras de acero inoxidable. Barcelona. 2001. ISBN 8469955225.

Siderita [en línea]. [Citado 14 jun., 2015]. Disponible en internet: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Siderita>>

STENERA, Jan; et. al. Direct measurement of internal material flow in a bench scale wet low-intensity magnetic separator [en línea]. Minerals and Metallurgical Research Laboratory, Dept. of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering. Suecia. Octubre 2015.

STENERA, Jan; et. al. Evaluation of the applicability of ultrasonic velocity profiling in conditions related to wet low intensity magnetic separation [en línea]. Minerals and Metals Research Laboratory, Luleå University of Technology. Suecia. 18 Septiembre 2013.

SVOBODA, Jan. Magnetic techniques for the treatment of materials. Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2004. ISBN 1-4020-2038-4.

Temperatura de Curie [en línea]. [Citado 14 jun., 2015]. Disponible en internet: <https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_Curie>

Temperatura de Neel [en línea]. [Citado 14 jun., 2015]. Disponible en internet: <https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_N%C3%A9el>

VENKATRAMAN, Partha; KNOLL, Frank; LAWVER, James. Chapter 7. Magnetic and electrostatic separation. En: Principles of mineral Processing. FUERSTENEAU, Maurice. Colorado: Society for mining, metallurgy, and exploration, Inc. 2003. p. 309. ISBN 0-87335-167-3.

WILLS, Barry; NAPIER-MUN, Tim. Magnetic and electrical separation. En: Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Butterworth-Heinemann, 2006. p. 353. ISBN 978-08-097053-0.

ANEXO A. PLANOS DEL EQUIPO DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA
POR VÍA HÚMEDA.

ANEXO B. CATÁLOGOS.